



Habilitation à Diriger des Recherches

Présentée par

Gilles VAITILINGOM

Titre : Qualité combustible des biocarburants : influences des caractéristiques particulières des huiles végétales terrestres et marines sur leur comportement en tant que remplaçant des produits pétroliers.

Soutenue le 1^{er} février 2013 devant le jury :

Rapporteurs : Jean François HETET, Professeur à l'Ecole Centrale de Nantes
Bernard LEDUC, Professeur à l'Université Libre de Bruxelles
Luis LE MOYNE, Professeur à l'Université de Bourgogne

Directeur : Pascal HIGELIN, Professeur à l'Université d'Orléans

Examineurs : Xavier PY, Professeur à l'Université de Perpignan
Xavier ROUAU, Directeur de recherches INRA
Yves LOZANO, chercheur CIRAD, HDR
Christine ROUSSELLE, Professeur à l'Université d'Orléans



Remerciements

Cela a déjà été écrit maintes fois : la recherche scientifique ne s'effectue pas seul, dans nos disciplines que sont la physique, l'énergétique, les sciences de l'ingénieur,... elle est le fruit d'échanges, de conseils, de remarques. Un simple dispositif expérimental entrevu furtivement, une phrase entendue dans un labo nourriront nos réflexions et nous aideront à progresser. Je remercie donc tous les enseignants, les chercheurs, les ingénieurs, les techniciens, les administratifs, les étudiants, ... les amis qui ont, que ce soit directement ou indirectement, contribué à ce parcours en recherche que ce mémoire aura la prétention d'exposer.

Je remercie tout d'abord les membres du jury qui m'ont fait le grand honneur d'évaluer ce travail. Les rapporteurs : Prof. Jean François Hetet, Directeur du Département Mécanique des Fluides & Energétique de l'Ecole Centrale de Nantes, Prof. Bernard Leduc, co-responsable de l'unité de recherche Mécanique des fluides au sein de l'Ecole Polytechnique de Bruxelles et Prof. Luis Le Moyne, Directeur de l'Institut Supérieur de l'Automobile et des Transports, pour avoir examiné ce mémoire. Et les examinateurs : Xavier Rouau, Pascal Higelin, Yves Lozano, Xavier Py et Christine Rousselle.

Pascal Higelin, à qui je dois tant. D'abord compagnon de recherche décisif dans la réussite de mes travaux de thèse, puis guide dans ma démarche d'HDR. Que dire de plus ? Merci Pascal, combien d'idées et de pistes de recherche que je n'aurais pu mettre en œuvre sans toi ?

Ces travaux ont suscité un certain nombre de thèses qui font directement suite aux travaux de Pascal et aux miens : Nageeb Eisa (1993), Alain Charlet (1994), Nathalie Chirat (1996), plus récemment Adrian O'Connell (2005), Tizane Daho (2008), Sayon Sidibé (2011). Merci à tous, j'ai repris plusieurs des résultats de vos propres travaux.

Mais il y a aussi une personne que je voudrais remercier dans ce mémoire. En mars 1981, fraîchement diplômé de l'ESEM Orléans (devenue Polytech'Orléans), je venais d'être embauché comme ingénieur au CEA quand j'ai reçu, via l'association de l'Ecole, une proposition de poste « pour développer les carburants de substitutions en Afrique ».

Le poste du CEA était très intéressant et bien pourvu en moyens de travail. Je me suis quand même rendu à un entretien au CEEMAT. Alfred Groos, vieux colonial et dur d'oreille, me demanda d'une voix forte : « mon jeune ami, avez-vous déjà travaillé sur les huiles végétales comme carburant des moteurs diesels ? ». Bien évidemment, non ! Quelle question ? Ce n'était pas du tout au programme de nos formations d'ingénieurs. Dès cet instant j'ai su que ma carrière prendrait une toute autre tournure. Pendant les 3 années avant son départ en retraite, Alfred m'a guidé, conseillé, chaperonné et fait découvrir l'intérêt des huiles végétales carburant. Nous avons aussi travaillé sur l'alcool éthylique dans plusieurs moteurs Diesels. Sur la conception de tracteurs de 30 ch. animés par un gazogène fonctionnant grâce à de la tige de cotonnier. Merci Alfred ! Merci aussi de m'avoir emmené, un après-midi de printemps 1984, rendre visite à M. Carbonaro. Alors très âgé et, quant à lui, « sourd comme un pot ». Il avait été le Président de la section Carburants de Remplacement de la SIA en 1944.

Son expérience immesurable dans la matière lui permit de m'avertir que travailler sur ces sources alternatives au pétrole était comme « entrer dans les ordres : un véritable sacerdoce », et qu'il ne fallait guère y espérer fortune et carrière. J'étais prêt pour la recherche publique !

Car, certains, même parmi les plus brillants, y ont laissé une bonne part de carrière, n'est-ce pas « Gaston » ?!

Merci Christelle, que j'ai « poussée » vers la sortie pour prendre un poste de MCF au CNAM Paris. Tu as travaillé 4 ans pour nous. Mais en 1995, la recherche publique française n'était pas prête pour pérenniser un 3^{ème} chercheur sur les biocarburants... Les choses ont bien évolué depuis.

J'ai effectué la plus grande partie des travaux présentés dans ce mémoire au sein ou en collaboration directe avec l'équipe ECM de PRISME (ex équipe moteur du LME de Polytech'Orléans). Sans eux, rien de ce que je présente ici n'aurait été possible.

Je remercie le Cirad, grâce à qui j'ai pu développer une spécialisation de carrière sur les carburants d'origine végétale aussi bien sur le plan de la recherche que sur celui de l'expertise et j'en tire de grandes satisfactions.

Et, c'est cet «équilibre permanent des activités » que permet le Cirad que je trouve intéressant. L'équilibre entre production scientifique, construction de partenariat, montage de projets « terrains » et responsabilité de management, constitue une part significative de motivation personnelle.

Gilles

A ma mère

Sommaire

Liste des figures.....	7
Liste des tableaux et photos	10
Résumé	12
1. Introduction / Préambule.....	13
2. Problématique générale.....	22
3. Synthèse des travaux de recherche	27
3.1 Caractérisation et étude des qualités des huiles végétales carburants	27
3.1.1 : Approfondissement des connaissances sur les huiles végétales	27
3.1.2 : Etude des liens entre la composition des huiles végétales et le délai d'inflammation en moteur Diesel.....	32
3.1.3 : Etude de l'influence des composés mineurs des huiles végétales sur le délai d'inflammation en moteur Diesel	48
3.1.4 : étude de l'évaporation de gouttelettes d'huiles végétales.....	52
3.1.5 : étude de l'évaporation de gouttes de mélange huiles végétales/fioul	59
3.1.6 : application aux biocarburants lipidiques issus de microalgues	74
3.1.7 : Contribution à l'élaboration de spécifications et normes pour les huiles végétales carburant	84
3.2 Optimisation de la combustion des huiles végétales carburants.....	94
3.2.1 : Etude de l'influence d'un additif procétane, le nitrate d'Héxyle, et de la température de l'air admis sur les délais d'inflammation des huiles végétales dans un moteur Diesel.	94
3.2.2 : Constats de l'influence des aspects thermiques sur le comportement des huiles végétales dans un moteur Diesel	98
3.2.3 : Optimisation de la combustion des huiles végétales dans les brûleurs.....	101
3.2.4 : Contribution à l'étude des huiles végétales de Coton et de Jatropha curcas comme biocarburant dans les moteurs diesels à injection directe.....	119
3.2.5 : Influence de la taille des gouttelettes de carburant et de la charge sur les performances, les émissions et les dégagements de chaleur dans un moteur alimenté avec de l'huile coton et ses mélanges avec du gazole.....	126
3.3 Etude et mise en œuvre des modifications techniques de moteurs et brûleurs.....	136
3.3.1 : Etude et mise en œuvre des modifications techniques de moteurs.	136
3.3.2 : Etude et mise en œuvre des modifications techniques de brûleurs.....	153

4. Projet de recherche	159
4.1 Connaissance des processus physiques et chimiques lors de la combustion des huiles végétales.	159
4.1.1 : Compréhension des mécanismes de dégradation des triglycérides.	160
4.1.2 : Approche par la chimie précombustionnelle.	163
4.2 Etude de formulations de carburants à base de biocarburants.....	165
5. Conclusions.....	167
Références/bibliographie	169
6. Curriculum vitae, publications, activités.....	173
 ANNEXE	 193

Publication : Daho T, Vaitilingom G, Sanogo O, Ouiminga SK, Segda BG, Valette J, Higelin P, Koulidiati J. Model for predicting evaporation characteristics of vegetable oils droplets based on their fatty acid composition. Int J Heat and Mass Transfer 2012;55: 2864–71.

Figures, tableaux et photos.

Figure 1 : extrait d'une compilation d'essais d'huiles végétales dans des moteurs diesels.....	26
Figure 2 : indice d'iode de 20 huiles végétales.....	29
Figure 3 : délais d'inflammation en fonction de la pression en début d'injection pour le gazole et 7 huiles végétales.....	34
Figure 4 : régressions obtenues à partir de l'équation (1') des délais d'inflammation en fonction de la pression en début d'injection pour le gazole et les 7 huiles végétales.	35
Figure 5 : relation entre indice de cétane et délai d'inflammation respectée par le moteur MWM.....	36
Figure 6 : cercle des corrélations dans les axes principaux 1 et 2 ; forte dépendance des variables DEL et SAT : délai et % d'acides gras saturés.....	40
Figure 7 : représentation des dépendances entre délai d'inflammation, pression dans la chambre au moment de l'injection et % d'acides gras saturés.....	41
Figure 8 : délais d'inflammation en fonction de la pression au moment de l'injection (moteur MWM) – résultats pour le gazole et les 7 mélanges.....	42
Figure 9 : régressions obtenues à partir de l'équation (1').	43
Figure 10 : représentation des individus dans le plan principal et classement selon l'ACP.	44
Figure 11 a et b : : délais d'inflammation en fonction de la pression au moment de l'injection (moteur MWM) – comparaison délais calculés/délais mesurés	46
Figure 12 : délais d'inflammation en fonction de la pression au moment de l'injection (moteur MWM) – comparaison délais calculés/délais mesurés. Résultats pour le tournesol à différentes températures d'air à l'admission.....	47
Figure 13 : schéma de l'installation du dispositif d'évaporation de gouttelettes.....	53
Figure 14 : Evolution de la surface projetée de deux gouttes de tournesol à 450°C.....	53
Figure 15 : évolution de la surface projetée et de la température au voisinage de la gouttelette en fonction du temps de 3 gouttes d'huile de palme	54
Figure 16 : évolution de la surface projetée de gouttelettes d'huiles végétales en fonction du temps pour - température finale 540°C.....	55
Figure 17 : évolution de la surface projetée de gouttelettes d'huiles végétales en fonction du temps pour - température finale 540°C.....	55
Figure 18 : détermination de la plage d'évaporation établie lors de l'évolution de la surface projetée normalisée d'une gouttelette d'huile végétale.	56
Figure 19 a et b : évolution de la surface projetée de gouttelettes d'huiles végétales en fonction du temps pour - température finale 630°C.....	57
Figure 20 : évolution de la surface projetée de gouttelettes d'huiles végétales en fonction du temps pour - température finale 440°C.....	58
Figure 21 : évolution de la surface projetée de gouttelettes d'huile de coton et de fioul en fonction du temps pour - température finale 773 K.	61

Figure 22 : évolution des surfaces projetées en fonction du temps de gouttelettes de fioul domestique (DFO), d'huiles de coton (cottonseed oil), de colza (rapeseed oil) et de jatropha curcas.	62
Figure 23 : taux d'évaporation instantané normalisé pour le fioul domestique aux différentes températures étudiées.....	63
Figure 24 : taux d'évaporation instantané normalisé pour les huiles végétales à 917 K à gauche et 873 K à droite.	63
Figure 25 : Constantes d'évaporation des huiles végétales et du fioul en fonction de la température. (Les incertitudes sont tracées pour le DFO et non pour les huiles végétales pour une meilleure lisibilité).....	64
Figure 26 : Influence du pourcentage d'huile de coton incorporé dans le fioul (DFO) à différentes températures.	65
Figure 27 : Evolution de d^2 en fonction du temps pour une gouttelette de CSO20 à 873 K. Illustration de la détermination du début de la «partie II» supposée être du pur CSO (huile de coton).	66
Figure 28 : Coefficients d'évaporation expérimentaux et théoriques comparés pour le fioul.....	69
Figure 29 : Coefficients d'évaporation expérimentaux et théoriques comparés pour l'huile de coton.....	70
Figure 30 : Evolution du dispositif expérimental de la caractérisation de l'évaporation des gouttes.	72
Figure 31 : température de fusion des acides gras saturés.	75
Figure 32 : Comparaison de la vaporisation des huiles à 320°C.	81
Figure 33 : comparaison de la vaporisation des esters méthyliques à 320°C.....	82
Figure 34 : délai d'inflammation en fonction de la pression dans la chambre séparée en début d'injection (moteur MWM).	95
Figure 35 : délai d'inflammation en fonction de la pression dans la chambre séparée en début d'injection. Les huiles végétales sont additivées de 4 % de nitrate d'hexyle.....	96
Figure 36 : délai d'inflammation en fonction de la pression dans la chambre séparée en début d'injection. Les huiles végétales sont additivées de 8 % de nitrate d'hexyle.....	96
Figure 37 : délai d'inflammation en fonction de la pression dans la chambre séparée en début d'injection. Température d'air à l'admission : 105°C.....	97
Figure 38 : délai d'inflammation en fonction de la pression dans la chambre séparée en début d'injection. Température d'air à l'admission : gazole = 25°C, huiles végétales = 105°C.....	97
Figure 39 : schéma du dispositif expérimental de mesure sur le brûleur NC4.	103
Figure 40 : puissance thermique du brûleur en fonction de la pression de pulvérisation.....	105
Figure 41 : Oxygène résiduel théorique et expérimental en fonction de la richesse (HC30).	107
Figure 42 : CO2 théorique et expérimental en fonction de la richesse (HC30).....	107
Figure 43 : SO2 théorique et expérimental en fonction de la richesse (HC30).	107
Figure 44 : schéma du dispositif expérimental sur le brûleur N10.	109

Figure 45 : Régime de désintégration d'un jet issu d'un orifice circulaire.	113
Figure 46 : Classification des différents régimes de désintégration du jet et critères de transition.	114
Figure 47 : Conditions d'atomisation sur le brûleur modifié N10.	115
Figure 48 : Diamètre moyen de Sauter du FOD et de l'huile de coton en fonction de la température du combustible 116	116
Figure 49 : Schéma de l'installation d'essai au 2IE de Ouagadougou.	121
Figure 50 : consommation spécifique en fonction de la charge avec jatropha réchauffé à 110°C et jatropha non réchauffé (Jpure).	123
Figure 51 : rendement global effectif en sortie alternateur en fonction de la charge avec jatropha réchauffé à 110°C et jatropha non réchauffé (Jpure).	123
Figure 52 : température des gaz d'échappement en fonction de la charge pour 0 % et 20 % de taux d'EGR.	124
Figure 53 : émission de CO en fonction de la charge pour 0 % et 20 % de taux d'EGR.	124
Figure 54 : émission de NOx en fonction de la charge pour 0 % et 20 % de taux d'EGR.	125
Figure 55 : émissions CO ₂ en fonction de la charge pour 0 % et 20 % de taux d'EGR.	125
Figure 56 : le Spraytec de la société Malvern.	127
Figure 57 : répartition cumulative et fréquence des tailles de gouttelettes dans le jet pour les 6 carburants.	128
Figure 58 : consommation spécifique en fonction de la charge pour les 6 carburants à 2500 tr/mn.	130
Figure 59 : rendement global en fonction de la charge pour les 6 carburants à 2500 tr/mn.	131
Figure 60 : teneur en CO en fonction de la charge pour les 6 carburants à 2500 tr/mn.	131
Figure 61 : teneur en NOx en fonction de la charge pour les 6 carburants à 2500 tr/mn.	132
Figure 62 : courbes de pression cylindre comparées aux 3 charges pour le fioul et l'huile de coton pure.	133
Figure 63 : taux de dégagement de chaleur comparés aux 3 charges à 2500 tr/mn pour le fioul et l'huile de coton pure.	134
Figure 64 : illustration de l'architecture de deux moteurs diesels à injection directe et à injection indirecte.	140
Figure 65 : schéma de double circuit d'alimentation HVP/gazole « Bicarburant » du Cirad.	146
Figure 66 : schéma du circuit particulier des brûleurs RIELLO pour les huiles végétales 158	158
Figure 67 : évolution de la surface projetée normalisée en fonction du temps pour le gazole et dix échantillons d'huile de colza à une température de 500°C.	161
Figure 68 : Illustration du phénomène de formation « d'œufs de crapauds » lors de la vaporisation sous air de gouttelettes d'huile de colza à 400°C (mêmes échantillons que dans la Fig. 67) avec le dispositif EVA.	162
Figure 69 : Montage d'évaporation d'huile de colza en ballon.	164

Figure 70 : chromatogramme de vapeurs d'huile de colza chauffées à 320°C.....	165
---	-----

Tableau 1 : acides gras rencontrés dans les huiles végétales et composition de 7 d'entre elles.....	30
Tableau 2 : caractéristiques physiques de 20 huiles végétales.....	31
Tableau 3 : Conditions d'essais du moteur MWM.....	34
Tableau 4 : indices de cétane déterminés grâce au moteur MWM BASF pour les huiles végétales, le gazole et l'ester méthyliques de colza.	36
Tableau 5 : indice d'iode et de cétane de 7 huiles végétales.....	37
Tableau 6 : composition en acides gras des huiles végétales testées.....	38
Tableau 7 : classement des individus issus de l'ACP comparé aux % d'acides gras saturés analysés et aux indices de cétane calculés dans le moteur MWM.....	45
Tableau 8 : exemples de compositions d'huiles végétales brutes.....	49
Tableau 9 : composition des huiles végétales avant et après purification.....	50
Tableau 10 : coefficients d'évaporation des huiles testées.....	56
Tableau 11 : propriétés physiques et chimiques des huiles végétales utilisées et du Fioul domestique.....	60
Tableau 12 : compositions en acides gras des huiles végétales utilisées.....	61
Tableau 13 : temps de chauffage phase 1 et durée totale de l'évaporation des gouttelettes de fioul (DFO), huile de coton, huile de colza et huile de Jatropha à 773 K, 873 K et 917 K.....	64
Tableau 14 : constantes d'évaporation pour les deux parties d'évaporation du fioul, l'huile de coton et de leurs mélanges.....	66
Tableau 15 : Masse moléculaire et point de fusion des principaux acides gras.	76
Tableau 16 : Composition en acides gras d'une huile de colza.....	77
Tableau 17 : Composition en groupes d'acides gras d'une huile végétale « idéale » à vocation biocarburant.....	78
Tableau 18 : composition en acides gras de 3 huiles végétales terrestres et de 5 huiles de microalgues : 4 marines et d'1 d'eau douce.....	79
Tableau 19 : Compositions comparées en acides gras de 4 espèces de microalgues avec une huile « idéale » à des fins biocarburant et l'huile de colza.....	79
Tableau 20 : caractéristiques carburant des huiles végétales.....	84
Tableau 21 : norme pour le fioul domestique (2005).....	85
Tableau 22 : proposition de norme pour l'huile de jatropha (pourghère) au Mali.....	90
Tableau 23 : proposition de norme pour l'huile de jatropha (pourghère) au Mali. Caractéristiques non retenues dans la norme proposée.....	92
Tableau 24 : caractéristiques des 5 huiles végétales retenues pour l'étude de l'influence du nitrate d'hexyle.....	95
Tableau 25 : températures et viscosités correspondantes des différents combustibles.....	103
Tableau 26 : caractéristiques physico-chimiques du FOD et de l'huile de coton raffinée.....	104
Tableau 27 : composition en acides gras de l'huile de coton raffinée utilisée.....	104

<i>Tableau 28 : Composition en acides gras totaux des huiles utilisées (% pondéral).....</i>	<i>111</i>
<i>Tableau 29 : caractéristiques physico-chimiques des différents combustibles.....</i>	<i>112</i>
<i>Tableau 30 : caractéristiques du jet d'huile de coton dans le brûleur N10.....</i>	<i>114</i>
<i>Tableau 31 : consommation d'huile de coton raffinée à différentes températures.....</i>	<i>116</i>
<i>Tableau 32 : Emissions de gaz incondensables.....</i>	<i>117</i>
<i>Tableau 33 : résultats d'émissions de composés organiques condensables.....</i>	<i>118</i>
<i>Tableau 34 : nomenclature et viscosité à 25°C des carburants testés.....</i>	<i>127</i>
<i>Tableau 35 : diamètres caractéristiques des gouttelettes des 6 carburants testés.....</i>	<i>129</i>
<i>Tableau 36 : caractéristiques du moteur Diesel Hatz monocylindre.....</i>	<i>129</i>
<i>Photo 1 : le gazogène à balle de riz installé à Karawang – Java – Indonésie.....</i>	<i>16</i>
<i>Photo 2 : tracteur agricole 70 kW et groupe électrogène 50 KVA, modifiés pour utiliser de l'éthanol 95. Ile de la Réunion et Ile Maurice.....</i>	<i>18</i>
<i>Photo 3 : dépôts dus à l'huile de tournesol sur injecteur et piston. Chemise rayée suite à des segments gommés.....</i>	<i>23</i>
<i>Photo 4 : Le dispositif d'évapo-stalagmométrie « EVA » du Cirad Montpellier.....</i>	<i>73</i>
<i>Photo 5 : arbustes de jatropha curcas en Afrique.....</i>	<i>86</i>
<i>Photo 6 : le brûleur N10 et la chambre de combustion.....</i>	<i>110</i>
<i>Photo 7 : installation d'essai du LBEB, Institut 2IE, Ouagadougou.....</i>	<i>122</i>
<i>Photo 8 : le dispositif de recirculation des gaz d'échappement du LBEB.....</i>	<i>122</i>
<i>Photo 9 : Piston injection directe au fioul et après 21 heures à l'huile de tournesol.....</i>	<i>138</i>
<i>Photos 10 : exemples de tracteurs agricoles modifiés ou adaptés par le Cirad pour utiliser des huiles végétales comme unique carburant.....</i>	<i>149</i>
<i>Photo 11 : exemples de brûleurs adaptés pour les huiles végétales par le Cirad et RIELLO.....</i>	<i>158</i>
<i>Photo 12 : dispositif d'évaporation dit « du tube » Photo 13 : dispositif « EVA ».....</i>	<i>161</i>

Résumé :

La composition d'une huile végétale a une grande influence sur sa qualité en tant que carburant. Les relations qui ont été établies, entre les composés majeurs d'une huile terrestre ou marine, et son comportement en tant que carburant pour moteurs, permettent une prédiction du délai d'inflammation, et sont liées à son coefficient d'évaporation ainsi qu'à sa tendance à former des dépôts carbonés dans les chambres de combustion. La faible influence des composés minoritaires des huiles a également été établie. Les actions sur l'inflammation grâce à un additif pro-cétane, ont révélé qu'en termes de formation de dépôts carbonés, la réduction du délai d'inflammation n'améliore rien. Nous avons constaté la prépondérance des aspects thermiques sur la qualité de la combustion des huiles végétales. L'étude des caractéristiques d'évaporation, a permis d'établir l'existence d'une température moyenne du milieu réactionnel à partir de laquelle les comportements des huiles et du fioul sont comparables (environ 500 °C). Les conditions thermiques favorables à une bonne combustion, sans dépôts carbonés, des huiles végétales ou de leurs mélanges avec le fioul, ont ainsi été définies. Les travaux ont montré que, la performance globale, l'analyse du taux de dégagement de chaleur et les émissions à l'échappement ne permettent pas une comparaison précise de la qualité de la combustion entre une huile végétale présentant de grosses gouttelettes dans le jet injecté, et du fioul ne présentant que de fines gouttelettes. Alors que, l'influence de la distribution granulométrique des gouttelettes, sur la polymérisation et la formation de dépôts dans les chambres de combustion, semble toujours être l'hypothèse la plus crédible. Il apparaît donc nécessaire d'approfondir les mécanismes de vaporisation des gouttelettes d'huile végétale, afin de parvenir à une meilleure connaissance des processus physiques et chimiques lors de la combustion des huiles végétales.

1. Introduction / Préambule.

Après un Deug Math/Physique (Paris XI-Orsay) j'ai obtenu un diplôme d'ingénieur en 1981 (ESEM devenue Polytech Orléans). Après 6 mois dans une entreprise privée, j'ai été recruté par le CEA que j'ai quitté en mars 1982 pour le CEEMAT (devenu CIRAD en 1986, qui a un statut d'EPIC). Ingénieur de recherche au Cirad, j'ai passé un DEA puis obtenu un doctorat en énergétique en 1992 (section CNU 62 - Université d'Orléans).

Je n'ai pas travaillé que sur les huiles végétales carburant. En effet, j'ai été recruté en 1982 par les « agronomes-machinistes agricoles » afin de développer des solutions de remplacement aux produits pétroliers pour la mécanisation et les opérations de post-récolte dans les pays du Sud. La situation, suite aux deux chocs pétroliers des années 70, révélait une fragilité des productions vivrières tropicales, si elles n'avaient pas accès à l'eau par exemple. Et quand la disponibilité en eau ne constituait pas le facteur limitant, l'absence d'énergie pour le pompage et l'irrigation restreignait le rendement des cultures.

J'ai donc été chargé par la direction du CEEMAT d'étudier les carburants végétaux, de les expérimenter et de développer les modifications techniques nécessaires des moteurs afin de les mettre en œuvre sur des terrains outremer et dans un domaine d'application avant tout rural concernant de petites puissances. J'ai travaillé sur les carburants alternatifs¹ suivants :

- gaz de gazogène (bois, résidus agricoles),
- alcool éthylique (canne à sucre, betterave,...),
- huiles végétales.

Aucune activité dans ce domaine n'existait au sein du Cirad. Il fallait me rapprocher des organismes français qui menaient des recherches ou des expérimentations sur ces thèmes. Le CEMAGREF (aujourd'hui IRSTEA, qui est un EPST) avait orienté ses travaux sur la gazéification de biomasses ligno-cellulosiques en lit fluidisé pour des installations de grandes tailles. L'IFP avait mené des essais sur les huiles de colza et développait son procédé d'estérification méthylique ESTERFIP. L'alcool éthylique, avant tout carburant pour moteurs à allumage commandé, était objet d'intérêt en France pour une utilisation en moteurs diesels agricoles.

Je vais résumer l'essentiel de mes activités sur *gaz de gazogènes* et *éthanol* car ils ont fait partie de mon parcours vers la connaissance et la prise en compte des particularités d'un carburant alternatif et m'ont beaucoup orienté pour l'étude des huiles végétales qui sont l'objet principal de mes recherches.

Pour chacun d'entre eux, je devais me poser les trois questions suivantes :

- Sont-ils compatibles avec les motorisations existantes ?
- Sinon, peut-il y avoir adaptabilité soit du carburant soit du moteur ?
- Quelles sont les contraintes d'utilisation ?

Enfin, ma lettre de mission du Cirad m'amenait à mettre en œuvre les solutions les plus adaptées aux contextes d'application et en premier lieu avec celui des pays en développement. C'est-à-dire : application pour de faibles puissances (5 kW à 300 kW) et

¹ Aujourd'hui appelés Biocarburants (carburants issus de la biomasse).

utilisation de biomasses locales (bois, coques de noix de coco, coques d'arachide, tiges de cotonnier, alcool de canne à sucre, huiles de coco, palme, coton, soja, jatropha,...).

Les gaz de gazogènes :

Je me suis consacré à la gazéification essentiellement entre 82 et 90. J'ai participé à la mise au point et à l'installation sur sites d'une douzaine d'unités gazo-électrogénatrices. Les biomasses combustibles étaient des tiges de cotonnier, des coques et bourres de noix de coco, du bois. Puis, avec mon collègue Claude Marouzé, entre 95 et 2000, nous avons conçu et développé une unité de gazéification de la balle de riz adaptée aux besoins des mini rizeries très nombreuses dans le monde en développement².

Pour l'électrification rurale décentralisée, mais pas uniquement, cette technologie présente bien des intérêts. En application électrification par groupe électrogène les gazogènes, avec une consommation spécifique de 1,3 kg de bois (à 12 % d'humidité) par kilowattheure électrique (sous cos Phi de 0,8), donnent un équivalent pratique global de 4,3 kg de bois pour substituer 1 litre de gasoil. Ces résultats sont significativement intéressants pour les zones éloignées ou enclavées où le bois est une ressource abondante³.

La gazéification de matières ligno cellulosiques produits des gaz combustibles, ces derniers sont majoritairement CO et H₂. La composition des gaz issus de la gazéification du bois à l'air est en moyenne :

CO : 20 %	H ₂ : 20 %	CH ₄ /C ₂ H ₄ : 2 %	N ₂ : 44 %	CO ₂ : 14 %
-----------	-----------------------	--	-----------------------	------------------------

Le pouvoir calorifique inférieur moyen de ces gaz se situe entre 5200 et 5800 kJ/m³ (1,44 et 1,61 kWh/m³).

➤ Compatibilité avec les motorisations existantes :

Cet aspect n'a pas posé de problème particulier que ce soit pour des utilisations en moteurs à allumage commandé ou en dual-fuel dans des moteurs Diesel. (voir publication avec le CEA ⁴).

➤ Contraintes d'utilisation :

- a. Les installations sont encore aujourd'hui essentiellement conçues en « utilisation directe des gaz », c'est-à-dire sans stockage des gaz produits, l'épuration et le refroidissement doivent s'effectuer en continu. Les unités de filtration présentent généralement un volume total correspondant à 5 % du volume nominal horaire des gaz. On ne dispose que de quelques minutes pour abaisser leur température de sortie (300-500 °C) à la température ambiante, pour filtrer les cendres, les poussières et pour condenser l'eau de formation lors de la conversion thermochimique ainsi que les goudrons présents dans les gaz.

La filtration et le refroidissement des gaz de gazogènes demeurent le verrou majeur à la diffusion de cette technologie.

² **Vaitilingom G, Marouzé C.** 1995. Heat and electricity from rice husks gasifier for small to medium mills. In International Conference on Grain Drying in Asia, FAO-ACIAR-GASGA, Bangkok, 17-20 October. 3 p.

³ au prix actuel du fioul en France (0.79 €/litre avant tic et TVA), cela donnerait à la tonne de bois une valeur d'environ 184 €.

⁴ **Vaitilingom G., Lemaitre Y.** 1985. Gazogène : Les économies envisageables avec un groupe électrogène dual-fuel, mythe ou réalité?. *Machinisme Agricole Tropical* (90) : 83-86.

J'avais défini un sujet de fin d'étude de l'ESEM, afin de déterminer et quantifier les éléments solubles et insolubles présents dans les gaz dans l'objectif d'aider à la conception de systèmes d'épuration efficaces. (R. Razafitrimo, 1985. Etude de l'épuration des gaz de gazogènes. Mémoire de fin d'étude ingénieur ESEM, Orléans, 150 p.).

- b. Une autre contrainte provient de la composition des gaz dont le pouvoir calorifique est significativement plus faible que pour du méthane par exemple. La présence d'oxygène dans la composition du bois ou des résidus agricoles donne un ratio Air/Gaz du mélange stœchiométrique proche de 1/1 quand celui du méthane est 9/1. Ce qui compense un peu le faible PCI des gaz de gazogène. Il en résulte cependant une perte de puissance de 30 % pour un moteur à allumage commandé connecté à un gazogène par rapport au méthane. J'avais là aussi proposé et encadré un DEA afin d'établir les bilans lors de la gazéification de la balle de riz (Ab. Elamin, 1988. Etude de la gazéification de la balle de riz. Mémoire de DEA, UTC-CEEMAT, 140 p.). Par ailleurs, la présence de composés acides dans les gaz provoquant des corrosions rapides de l'aluminium, m'a fait prendre la mesure de l'importance des composés minoritaires et de leur influence.
- c. Les conséquences de cette baisse de puissance m'ont amené à définir et mettre en œuvre les modifications techniques des moteurs afin d'optimiser leur performances. J'ai étudié et réalisé des adaptations telle l'augmentation du rapport de compression, possible jusqu'à 15 :1 grâce à la présence du CO. J'ai également développé un mélangeur air/gaz basé sur le principe de Venturi évitant ainsi l'usage d'un papillon ou d'une vanne sensible à la corrosion et aux goudrons.

J'illustrerai mon apport personnel grâce à quelques réalisations. L'essentiel de mes travaux sur ce sujet relève du génie des procédés et des sciences de l'ingénieur. Beaucoup de données ont été présentées dans des congrès⁵ et reprises et exploitées par d'autres équipes. J'ai mené personnellement 7 projets d'installations de gazogènes Outremer, j'ai été membre du « Gasifier Roundtable Panel of expert » de la FAO de 1987 à 1990. J'ai participé aux tests des unités que les constructeurs soumettaient sur la plateforme de gazogène du CEMAGREF (IESTE) à Antony. Aujourd'hui, au sein de l'Unité Propre de Recherche Biomasse Energie du Cirad, de plus jeunes collègues chercheurs se consacrent à la gazéification et plus particulièrement sur la qualité des gaz et sur l'amélioration des rendements de conversion du carbone solide.

Photos : le gazogène à balle de riz – Indonésie.

⁵ El Hassan A., Vaitilingom G. 2001. Options techniques de transformation des sous-produits agricoles à des fins énergétiques : élément contre la détérioration des ressources naturelles au Soudan.: *actes du symposium international sur la biomasse énergie*. Abidjan, 29 novembre au 2 décembre 1999. Abidjan, Côte d'Ivoire.



Photo 1 : le gazogène à balle de riz installé à Karawang – Java – Indonésie (Vaitilingom, 2003).

L'alcool éthylique carburant Diesel :

Tout comme pour les gazogènes et les huiles végétales, les travaux sur l'utilisation d'alcool éthylique comme carburant agricole ont commencé en 1982. Cette activité a représenté 50 % de mon temps jusqu'en 1986.

Si l'éthanol carburant des moteurs à allumage commandé fait partie de l'histoire des moteurs à combustion interne, son usage en moteur type Diesel est beaucoup moins répandu. A la fin des années 70, les perspectives d'une crise dans le Golfe Persique avait sensibilisé le Monde aux conséquences d'une pénurie de produits pétroliers. La vulnérabilité des agricultures des Pays du Nord, totalement dépendante du pétrole, était devenue un enjeu majeur et tous les continents finançaient des études d'utilisation d'éthanol ou d'huiles végétales dans les engins agricoles.

La mission du Cirad était d'aider les périmètres sucriers tropicaux à accéder à l'autonomie en carburant mais également de permettre l'usage de l'éthanol en faveur des activités rurales (petite motorisation, irrigation, électrification).

J'ai donc été amené à participer à la mise au point et à l'expérimentation d'une dizaine de moteurs diesels « à alcool » en partenariat avec une société Orléanaise qui s'appelait MOTEURGARO et avec son ingénieur Alain Liennard qui rejoignit le Cirad en 1991.

➤ Compatibilité avec les motorisations existantes :

Aucune solution n'existait alors en moteur Diesel. La raison première est la mauvaise aptitude à l'auto inflammation de l'éthanol (indice de cétane : 5).

➤ Adaptabilité du moteur ou du carburant :

Plusieurs procédés étaient en cours d'essais à travers le Monde. Ceux qui conservaient le gazole comme carburant de base s'appuyaient sur la fumigation d'alcool à l'admission d'air ou sur la double injection (2 injecteurs distincts par cylindre).

Notre cahier des charges imposait une utilisation pure de l'éthanol. Nous avons travaillé sur deux options possibles.

- La première consiste à modifier le moteur diesel existant en installant un système hybride entre le cycle essence (allumage commandé) et le cycle diesel (taux de

compression élevé). Il est nécessaire d'installer un système d'allumage et d'injection adapté (principe MOTEURGARO).

- La seconde permet de ne pas apporter de modifications au moteur diesel mais à incorporer à l'éthanol des additifs « procétane », qui sont des « explosifs liquides » miscibles avec l'alcool et qui simulent un indice de cétane proche de celui du fioul. L'éthanol se comporte alors comme du fioul et s'utilise comme tel (Aujourd'hui, 600 autobus fonctionnent ainsi en Suède).

Nous avons utilisé un produit mis sur le marché par ICI en Afrique du Sud: le Blendol. Il s'agissait d'un dérivé nitré de l'éthylèneglycol, le Tri Ethyl Glycol Di Nitrate. Le même produit ICI-Angleterre s'appelait Avocet. De très bons résultats avaient été obtenus sur 4 autobus de la ville de Tours qui ont fonctionné pendant deux ans avec de l'éthanol non anhydre additivé de 4 % d'Avocet.

Ces deux options présentent l'avantage de permettre l'utilisation d'éthanol non anhydre contenant jusqu'à 10 % vol. d'eau.

➤ Contraintes d'utilisation :

- a. La première contrainte est d'ordre physique : la viscosité trop faible de l'éthanol induit rapidement l'usure des organes de pompes et des aiguilles d'injecteurs. C'est sans doute l'écueil majeur qui entraîna l'abandon des tests les plus avancés en Europe, au Brésil et aux USA. Nous avons tenté l'addition de fluides lubrifiants de haute qualité sans réel succès. C'est finalement le traitement avec des poudres de bisulfure de molybdène (MoS₂) accompagné d'un travail métrologique qui résolut ce problème. Nous n'avons pas publié ces résultats qui appartenaient au savoir-faire de MOTEURGARO et qui avait établi des contacts avec le NMERI en Afrique du Sud.
- b. L'acidité de l'éthanol s'est révélée être impactante sur la corrosion des nez d'injecteur. Ce phénomène n'était pas ou peu décrit alors. Cet aspect soulignait, là aussi, l'influence des composés ou propriétés mineures d'un carburant. Nous avons donc posé l'exigence d'un Ph neutre pour un usage carburant.
- c. Les contraintes d'ordre chimique sont assez bien connues, la vulnérabilité de certains matériaux avec l'éthanol ou le méthanol est prise en compte par les constructeurs automobile depuis la disparition du plomb tétraéthyle et sa substitution par ces alcools à haut indice d'octane.
- d. L'action de l'eau dans les mélanges à faibles teneurs en éthanol. Je mentionne une dernière contrainte à part des précédentes, car s'il elle est bien prise en compte dans les mélanges essence/éthanol (E5, E10), elle est moins connue lors des usages de 1 à 20 % d'éthanol anhydre dans les gazoles. Le principal problème posé est la démixtion dès qu'est atteint un équivalent de 2-3 % d'eau par volume d'éthanol. Il est nécessaire alors de recourir à un additif tiers solvant.

J'ai participé aux travaux de thèse de Pascale Satgé-de Caro, dirigé à la fois par l'INP Toulouse (Prof. Michel Delmas) et le LME d'Orléans (Prof. Andrzejewski). Elle a étudié la synthèse d'additifs polyfonctionnels oxygénés pour le carburant diesel mixte gazole-éthanol. L'objectif était de réduire les émissions de particules et de NO_x sans dégrader le fonctionnement dans des moteurs diesels non modifiés. Le rôle de l'additif est triple : maintenir l'indice de cétane du mélange malgré la présence d'éthanol jusqu'à des taux de 20 %, assurer une viscosité du mélange conforme aux spécifications du gazole pur, et

assurer la stabilité du mélange même en présence d'eau. Nous avons publié un article dans la revue FUEL en 2000⁶.

Ici aussi, j'illustrerai mon apport personnel grâce à quelques réalisations. On retrouvera dans le chapitre 6, l'intitulé des contrats relatifs à l'éthanol carburant Diesel.



Photo 2 : tracteur agricole 70 kW et groupe électrogène 50 KVA, modifiés pour utiliser de l'éthanol 95. Ile de la Réunion et Ile Maurice (Vaitilingom 1986).

Les huiles végétales carburant Diesel :

Les huiles végétales carburant sont « les personnages importants » de ce mémoire car ce sont elles qui m'ont mené à la recherche. J'ai été chargé de les étudier simultanément avec les gaz de gazogènes et l'éthanol en Diesel et elles m'ont vite intéressé.

En août 1982, je me suis rendu à Fargo (North Dakota) où j'étais le seul auditeur français⁷ à la conférence internationale sur les huiles végétales carburant.

Travaillant seul au Ceemat, et au vu des conclusions de la conférence, j'ai compris que je devais effectuer des recherches bibliographiques approfondies et me rapprocher de laboratoires universitaires (Paris 6 et Orléans) et de sociétés privées (RENAULT, PSA,...) pour étudier, expérimenter et mettre au point l'utilisation de ces carburants.

Courant 83, je suis retourné à Orléans sur les lieux de TP que j'avais « martyrisé » 2 ans plus tôt. Avec Jean Christophe Berge, nous avons décidé de monter au banc d'essai un moteur diesel F8M (fourni par Renault division moteurs industriels) et, avec les huiles tropicales restantes de l'opération AFME, de débiter un travail d'analyse des performances globales et d'essais longue durée. L'année suivante ont eu lieu les premiers essais d'huile végétale en diesel à Orléans lors du stage de Ph. Bourgeois⁸.

⁶ P. Satgé de Caro, Z. Mouloungui, G. Vaitilingom, J. Ch. Berge, 2001. Interest of combining an additive with diesel-ethanol blends for use in diesel engines. FUEL 80 (2001) 565-574.

⁷ Avec Michel Bernon, attaché scientifique au consulat de France à Chicago.

⁸ Ph. Bourgeois, 1984. Etude de la faisabilité d'un moteur Renault 11 diesel fonctionnant à l'huile de coton. Mémoire de stage ingénieur ESEM, CEEMAT-ESEM, 120 p.

A la même période, nous avons des financements de l'AFME qui nous permettaient d'effectuer des essais sur banc de 3 moteurs diesels français à St Cyr l'école (Paris VI) et à Rueil Malmaison sur les bancs de l'IFP. C'est à ST Cyr l'Ecole que j'ai fait la connaissance de Jean Andrzejewski qui encadrait les travaux de thèse de Ph. Pascal (1984) autour d'un de nos moteurs alimentés avec des huiles de palme et d'arachide. Jean devait prendre un poste de Professeur à l'ESEM d'Orléans. La boucle se bouclait.

Sous ses conseils, je me suis inscrit au DEA Conversion de l'énergie de Paris VI/Orléans (1986). Grâce à l'installation réalisée à l'occasion du stage de Bourgeois et avec l'appui financier du CEEMAT, nous avons permis le déroulement des parties expérimentales de la thèse de Ch. Jalinier (1988) [26]. A sa suite, je me suis donc inscrit en thèse et j'ai convaincu le Ceemat d'établir un CDD pour Pascal Higelin, afin qu'il puisse, lui aussi, commencer une thèse sur les aspects thermiques liés au type de moteur sur la combustion des huiles végétales.

La suite a été une collaboration active qui dure encore aujourd'hui avec l'équipe EPM/PRISME.

Ces travaux ont suscité un certain nombre de thèses qui font directement suite aux travaux de Pascal et aux miens : Nageeb Eisa (1993), Alain Charlet (1994), Nathalie Chirat (1996), plus récemment Adrian O'Connell (2005), Tizane Daho (2008), Sayon Sidibé (2011), Augustin Zongo (soutenance en 2013).

➤ Compatibilité avec les motorisations existantes :

Un faisceau de présomptions semblait indiquer un bon fonctionnement en diesel à injection indirecte, et parfois des problèmes de formation de dépôts carbonés en injection directe. Mais les avis et les publications restaient apparemment contradictoires.

➤ Adaptabilité du moteur ou du carburant :

Les conclusions de la conférence de Fargo convergeaient vers l'estérification des huiles, considérant que la viscosité élevée des huiles expliquait tous les problèmes de fonctionnement identifiés.

➤ Contraintes d'utilisation :

Il semblait ne ressortir, en fin de compte, que des contraintes liées à la viscosité élevée des huiles végétales. Au vu de certains résultats contradictoires relevés dans les publications, je me suis d'abord aperçu que 95 % d'entre elles ne mentionnaient rien quant à la qualité des huiles utilisées. Etaient-elles raffinées, brutes, semi-raffinées,... ?

Ce questionnement m'importait précisément, parce que mon domaine d'application outremer tropical et rural apparaissait peu propice aux raffinages des huiles végétales.

Pour mon DEA, j'ai donc étudié et analysé les publications ainsi que les travaux menés par nous-mêmes à Paris VI, à l'IFP et à l'ESEM. Je me suis aperçu qu'il demeurait des zones d'ombre et des conclusions parfois contradictoires dans les articles.

J'avais « pompeusement » intitulé mon mémoire «Huiles végétales carburant : propositions de réorientation des recherches ». C'était le point de départ de mes recherches que je présente dans les chapitres suivants.

Le chapitre 2 pose la problématique générale autour des ces huiles végétales carburant des moteurs diesels. Le point de départ est la conférence internationale de Fargo⁹. Elle a regroupé 400 participants de tous les continents et les résultats et conclusions exposés alors demeurent des sources d'informations de très hautes valeurs.

C'est aussi le point de départ de mes recherches.

Le chapitre 3 expose la synthèse de mes travaux. Il est présenté en trois parties, la première traite des activités sur la caractérisation et l'étude des qualités des huiles végétales carburants. Dans mon cheminement en recherche, cette partie prend une place importante. La composition des huiles végétales a une grande influence sur leur qualité en tant que carburant. Les relations qui ont été établies entre les composés majeurs d'une huile terrestre ou marine et son comportement en tant que carburant permettent une prédiction du délai d'inflammation, et sont liées à son coefficient d'évaporation ainsi qu'à sa tendance à former des dépôts dans les chambres de combustion. La faible influence des composés minoritaires des huiles est également établie.

La seconde partie porte sur l'optimisation de la combustion des huiles végétales carburants. Les tentatives d'agir sur l'inflammation grâce à un additif procétane ont été positives mais ont révélé que l'initiation de la combustion ne modifiait pas son déroulement. Dans des conditions de formation de dépôts carbonés, la réduction du délai d'inflammation n'améliore rien. Nous avons constaté la prépondérance des aspects thermiques liés au type de moteur sur la qualité de la combustion des huiles végétales.

La troisième partie porte sur l'étude et la mise en œuvre des modifications techniques de moteurs et brûleurs. C'est la partie finalisée de mes travaux, pilotés par des projets de « terrain », ils s'effectuent sous la forme de contrats publics et privés,

Le chapitre 4 présente les projets de recherche qui sont orientés vers la connaissance des processus physiques et chimiques lors de la combustion des huiles végétales. Enfin, le chapitre 5 dresse les conclusions de ce travail de recherche sur les huiles végétales terrestres ou marines à des fins de carburant.

On ne peut pas parler de travaux sur des carburants alternatifs sans mentionner et expliciter les difficultés rencontrées quand on décide de mener des recherches dans ce domaine.

Les difficultés inhérentes à cette activité sont essentiellement liées à des problématiques énergétiques très différentes entre nos pays du Nord et ceux du Sud. L'offre technologique (petits moteurs pour l'agriculture, tracteurs, groupes électrogènes,...) était peu développée, à l'image des autres énergies renouvelables. Le marché européen, par exemple, est encore très peu porteur pour les biocarburants (en France, leur usage est limité et très réglementé). La conséquence a été une baisse de la demande de la part des pays en développement dès la fin des années 80 (baril retombé à 12 US\$). Ainsi, durant les années 90, mon activité s'est reportée sur l'électrification rurale des zones enclavées ou insulaires. Les bailleurs de fonds internationaux y ont concentré leurs appels d'offre, mais exclusivement basés sur le photovoltaïque et l'éolien. Nous avons dû mettre au point et développer nous-mêmes dans les ateliers du Cirad les premiers groupes électrogènes à huiles végétales (Tchad, Mali, Nouvelle Calédonie, Fidji,...).

Ceci se répercutait aussi sur les aspects scientifiques : moins d'intérêt de la part des revues internationales pour des articles « biocarburants », arrêt des financements européens en faveur des bioénergies pour les pays en développement. Les soutiens en

⁹ Vegetable Oils as Fuel. International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuel, American Society of Agricultural Engineers, August 2-4, Fargo, North Dakota, 1982.

R&D sont devenus marginaux, dès le milieu des années 90 l'ensemble des Centres travaillant en coopération a abandonné cette thématique.

Aujourd'hui, dans un contexte caractérisé par une volatilité des prix des matières premières et des fluctuations des prix du pétrole inattendues dans leurs amplitudes, on observe une relance de la demande « énergie locale » orientée vers la production agricole (pompage-irrigation, mécanisation, post-récolte). La question de la compétition alimentaire/énergétique n'appelle pas les mêmes réponses pour nos transports et pour l'agriculture africaine. Les concepts de durabilité, MDP (mécanisme de développement propre) ne peuvent plus esquiver bien longtemps les projets qui utilisent des parts de carburants issus des biomasses locales. Enfin, l'interrogation sur l'opportunité de développer des carburants de la biomasse dans et pour les pays du Sud, a fait place à la décision des Etats du Sud de s'y engager, et c'est désormais un sujet prioritaire dans tout le monde tropical.

2. Problématique générale

En 1982, il n'était pas encore question « d'après pétrole » ni de changement climatique global. Mais le pétrole, en particulier pour les transports, avait montré sa place stratégique pour l'économie mondiale lors des deux chocs pétroliers de 73 et 79.

Un constat fort avait été fait : l'agriculture moderne est dépendante du fioul pour sa motorisation. Les sources traditionnelles de combustibles pour moteurs diesels agricoles venaient d'être sous la menace de rupture d'approvisionnement, de dégradation de la qualité et d'escalade des coûts. Existait-il des alternatives ?

Car l'évaluation avait été établie par l'agriculture des USA : en cas de rupture durable d'approvisionnement, les réserves ne permettaient pas d'effectuer les cycles culturaux complets, c'est-à-dire que, si les semis étaient réalisés, les récoltes ne pouvaient pas être assurées.

L'opinion, à l'ouverture de la conférence de Fargo en 1982, était que les huiles végétales étaient les candidats les plus prometteurs, tirés de l'agriculture, comme substituts ou additifs aux combustibles fossiles diesel. Ces huiles semblaient avoir le potentiel de rendre les collectivités agricoles autonomes en carburant afin de poursuivre leurs activités.

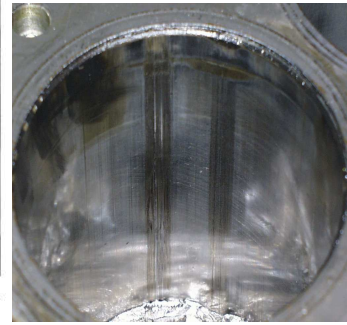
En effet, un certain nombre d'avantages se dégageaient en faveur de leur utilisation.

Les huiles végétales ont des propriétés énergétiques proches de celles du fioul et les performances globales comparées sont proches (à puissance égale, on observe une surconsommation moyenne en volume de 8 % avec les huiles). Produites par l'agriculture, elles ne sont pas un substitut direct de l'essence mais bien du gazole qui est le « carburant agricole numéro un ». Par ailleurs les huiles végétales se mélangent très bien aux fiouls. Ce « carburant agricole potentiel » peut être produit directement sur l'exploitation. L'huile végétale est issue de cultures annuelles ou de plantations pérennes existantes. L'impact sur l'écosystème local est aisément évaluable. Les moyens de production s'appuient sur des techniques et des technologies disponibles et existantes en petites, moyennes ou grandes capacités. Enfin, une huile impropre à la consommation humaine pouvait être utilisée comme carburant.

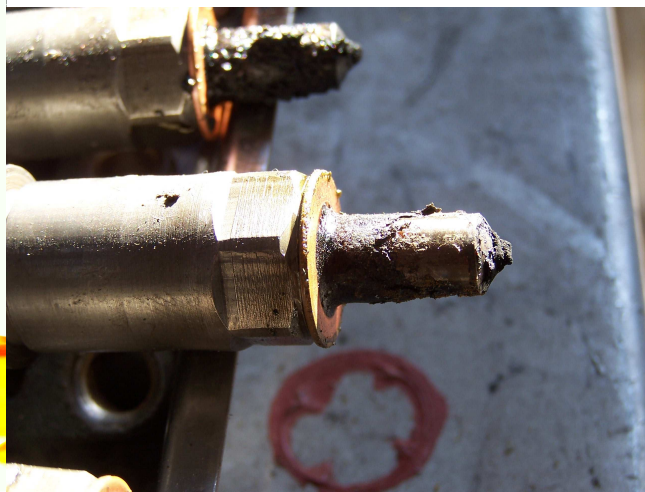
Mais face à ces avantages, l'histoire le confirmait partiellement, il apparaissait un inconvénient majeur à l'usage carburant des huiles végétales : des dépôts carbonés se formaient dans le haut moteur (segments, pistons, soupapes) et autour des orifices des nez d'injecteurs. Les jets déviés et détériorés favorisaient la formation d'imbrûlés qui ruisselaient vers le bas moteur, aidés en cela par une efficacité des segments diminuée, et dans les cas les plus défavorables induisaient la polymérisation du lubrifiant.



Figure 10 - encrassement typique dû aux huiles végétales (piston de moteur à injection directe, 10 heures de ralenti à vide, huile de tournesol raffinée)



dépôts dus à l'huile de tournesol sur injecteur et piston (Higelin, 1991). Chemise rayée suite à des segments gommés (AAN- Allemagne 2003).



Dépôts sur culasse et injecteur (vaitilingom)



Photos 3 : exemples de dépôts provoqués par l'utilisation d'huiles végétales dans des moteurs diesels à injection directe.

Il semblait établi que le type de moteur avait une grande importance dans la combustion des huiles végétales. De l'huile pure (100 %) ne pouvait pas être utilisée dans les moteurs à injection directe alors qu'elle se comportait bien dans les moteurs à injection indirecte [1]. Les mélanges jusqu'à 20 % d'huile étaient supposés acceptables pour les

injections directes mais ne répondaient pas au problème de rupture d'approvisionnement pétrolier [2].

Ces problèmes étaient attribués à la forte viscosité des huiles, de 10 à 20 fois plus élevée que celle du fioul, qui provoquait la mauvaise atomisation du jet et, par conséquent, la combustion incomplète. Quelques articles indiquaient la non volatilité des huiles végétales et le fait qu'elles ne distillaient pas complètement. Ceci de façon différente selon les huiles étudiées [3].

Les tentatives de réduction de la viscosité en réchauffant les huiles ne donnèrent pas d'améliorations visibles sur la formation de dépôts au nez des injecteurs [4]. Plusieurs travaux ont présentés leurs résultats sur l'utilisation d'additifs pour résoudre ces problèmes [4], [5], [6], toujours sans succès.

Toutes les publications convergeaient vers la transestérification des huiles végétales comme solution permettant de résoudre les problèmes de formation des dépôts et la combustion incomplète. L'ester, généralement méthylique, ainsi produit, présente des points de trouble et de solidification significativement plus bas que l'huile d'origine. [7], [8].

L'IFP qui étudiait la formation des dépôts au nez des injecteurs [9] était arrivé aux mêmes conclusions, et développait l'estérification méthylique des huiles comme combustible Diesel [10] [11].

Quelques auteurs étaient rentrés plus en détail dans les caractéristiques particulières des huiles végétales. Ryan et al. [12] avaient étudié l'atomisation du jet avec des huiles réchauffées jusqu'à 145 °C, afin qu'elles présentent la même viscosité que le fioul à 40 °C. Ils avaient également prévu d'observer les différences éventuelles de comportement entre des huiles de soja, arachide, tournesol et coton à différents degrés de raffinage. Ils avaient discuté l'effet positif de la réduction de viscosité sur la forme du jet en soulignant une amélioration plus importante que prévue entre un réchauffage à 100°C et à 145°C. Enfin, ils avaient constaté une tendance à la formation de dépôts plus importante pour l'huile de tournesol raffinée que pour celle de soja brute, avançant l'hypothèse que la composition chimique des huiles devait avoir un lien avec la tendance à la formation des dépôts.

Un petit nombre de publications ont tenté de décrire les étapes de formations de ces dépôts. Korus et al. ont étudié la polymérisation des huiles en séparant la polymérisation oxydante et la décomposition thermique présente compte tenu des niveaux de températures rencontrés lors de l'injection et dans la chambre de combustion [13].

Comme dans les travaux de Ryan et al., les auteurs ont utilisé des huiles de composition chimique différentes et marquées. Ils concluaient que la formation de dépôts devait être réduite avec des huiles à moindre degré d'insaturation accompagnées d'une atomisation correcte des gouttelettes.

En résumé, l'état de l'art en août 82 indiquait un bon fonctionnement des huiles végétales dans les Diesel à injection indirecte sans avancer d'explications particulières. Mais ceci rejoignait l'hypothèse forte que les constats de combustion incomplète menant à la formation de dépôts carbonés, étaient essentiellement liés à la viscosité élevée des huiles végétales. Les moteurs à injection directe, bien plus sensibles à la qualité du jet et

à l'atomisation des gouttelettes de carburant, présentant rapidement des dépôts et des taux d'imbrûlés élevés.

L'indicateur fort était, en revanche, le bon comportement général des esters d'huiles végétales quel que soit le type de moteur diesel.

Les premières investigations prenant en compte les caractéristiques physico-chimiques des huiles n'ont guère eu de suites publiées. En effet, cette conférence internationale de Fargo, tout aussi riche ait-elle pu être, a été la dernière sur les huiles végétales carburant.

Il demeurait des zones d'ombre dans mon esprit.

- Certains essais, pourtant bien décrits et scientifiquement recevables, étaient en contradiction avec d'autres publications effectuées sur les mêmes moteurs avec des huiles végétales de mêmes noms.
- Certains esters méthyliques avaient provoqué des formations de dépôts qualitativement et quantitativement identiques à ceux formés avec des huiles naturelles (source : nos essais en 83 à St Cyr l'Ecole avec un ester méthylique de colza).
- Pourquoi une différence si significative de comportement avec un même lot d'huile entre injection directe et indirecte ? (source : nos travaux sur moteur à injection directe à St Cyr l'Ecole et injection indirecte à l'IFP en 83).

Le tableau suivant est un extrait de la compilation de 92 essais que j'avais établi en 1983 suite à la conférence de Fargo. Il réunit les résultats sur différents moteurs et pour dix huiles courantes, à des degrés de raffinage différents.

On y trouve, par exemple, deux tracteurs Allis Chalmer 7020 à injection directe, alimentés avec un mélange 50/50 huile de tournesol raffinée/fioul, appartenant à la même expérimentation [14]. L'un d'eux a effectué 700 heures sans problèmes alors que l'autre a dû stopper ses tests après 393 heures car ses segments de feu¹⁰ étaient tous collés par des dépôts carbonés.

Il semble se dégager un lien entre degré de raffinage élevé et bon comportement en moteur pour les huiles de tournesol et de soja. Mais ce n'est pas vérifié pour l'huile de coprah.

On recense des essais en injection indirecte qui ont provoqué des dépôts avec des huiles brutes.

Il m'apparaissait nécessaire d'approfondir une approche liant des **caractéristiques particulières aux huiles végétales**, lesquelles sont différentes l'une de l'autre, **avec des critères de qualité carburant** à établir car dépassant la liste des propriétés retenues par les normes propres aux carburants pétroliers.

Il était aussi indispensable **d'étudier « le déroulement de la combustion »** des huiles végétales vis-à-vis de celle du fioul et de tenter de comprendre les différences de comportements entre injection directe et indirecte.

¹⁰ C'est l'anneau métallique élastique placé en partie supérieure du piston et qui assure l'étanchéité entre la chambre de combustion et le carter du moteur.

TYPE DE MOTEUR OU DE VEHICULE	INJECTION DIRECTE: D INDIRECTE: I	CYLINDREE (l)	REGIME D'UTILISATION (tr/mn)	UTILISATION Kilomètres: Km Heures: h	CARBURANT UTILISE (% en mélange avec du gazole)	TRAITEMENT DE L'HUILE UTILISEE	OBSERVATIONS
CATERPILLAR 3308	D	10,45	1500	essai court	100% tournesol	désodorisé (115°C)	dépôts injecteurs
CATERPILLAR 3308	D	10,45	1500	essai court	100% soja	brute (115°C)	dépôts injecteurs
CATERPILLAR 3308	D	10,45	1500	essai court	100% soja	dégommée (145°C)	-
CATERPILLAR 3308	D	10,45	1500	essai court	100% soja	semi-raffinée (145°C)	-
CATERPILLAR 3308	D	10,45	1500	essai court	100% soja	light hydro (145°C)	-
BUDA DIESEL	I	0,522		210 h	100% tournesol	dégommée	-
MF 240	D			15 h	20% tournesol	dégommée	dépôts injecteurs
MF 240	D			5 h	100% tournesol	dégommée	dépôts injecteurs
FORD 7000	D			24 h	20% tournesol	dégommée	dépôts injecteurs
MF 275	D			5 h	20% tournesol	dégommée	dépôts injecteurs
LOMBARDINI 720	D		2500	7 h	100% linseed	brute	dépôts injecteurs
LOMBARDINI 720	D		2500	88 h	100% colza	raffinée	légers dépôts
LOMBARDINI 720	D		2500	200 h	méthyl linseed		-
PERKINS 3.152	D	2,5	2500	essai court	100% colza	raffinée	-
HATZ E 79	I			350 h	100% palme	brute	-
HATZ E 79	I			350 h	100% arachide	brute	-
HATZ E 79	I			100 h	100% coton	brute	-
HATZ E 79	I			39 h	100% colza	brute	encrassement
HATZ E 79	I			50 h	100% colza	dégommée	-
DEUTZ F3L 912W	I			2300 h	100% tournesol	dégommée	-

Figure 1 : extrait d'une compilation d'essais d'huiles végétales dans des moteurs diesels [20].

3. Synthèse des travaux de recherche

3.1. Caractérisation et étude des qualités des huiles végétales en tant que combustibles

Les biocarburants, qu'ils proviennent de voies biologiques ou thermochimiques, ne répondent généralement que partiellement aux spécifications requises par les constructeurs de moteurs à combustion interne, ceci les met souvent « hors des normes carburant » en vigueur. Par ailleurs les tests « pétrole » ne renseignent généralement pas sur les qualités en tant que combustibles des biocarburants.

Il est alors nécessaire de développer de nouvelles méthodes d'analyse et de tests innovants qui rendent possibles des comparaisons d'aptitudes « carburant » avec les produits pétroliers.

C'est cet aspect qui fait l'objet de mes travaux de recherche, l'ambition raisonnable sous jacente étant de contribuer à de nouvelles normes techniques pour les biocarburants.

Les travaux vont concerner l'identification et la quantification des composés majoritaires et minoritaires des biocarburants, en faisant appel aux méthodes d'analyses existantes, mais avec souvent la nécessité d'adapter les protocoles aux particularités des biocarburants.

3.1.1 Approfondissement des connaissances sur les huiles végétales, produits industriels ou alimentaires.

Il apparaît nécessaire de regarder précisément : « qui sont ces huiles végétales » ?

Les corps gras en général sont avant tout des produits industriels issus de l'agriculture, de l'élevage ou de la pêche.

- Les corps gras végétaux, encore appelés oléagineux, sont les substances végétales à partir desquelles on tire des huiles et des graisses végétales.
- Les corps gras animaux fournissent les huiles et graisses animales : huile de foie de morue, de baleine, suif de mouton...
- Depuis quelques années, les huiles issues de micro-algues font l'objet de recherche. Ce sont des lipides végétaux non terrestres.

Remarque : Les travaux présentés sont tournés vers l'usage carburant des oléagineux mais bien des résultats et des conclusions pourraient s'appliquer aux corps gras animaux.

Les corps gras végétaux, produits agro-industriels sont entourés d'une chimie associée performante. Leurs propriétés et caractéristiques chimiques et physiques sont connues et bien détaillées.

Les substances à partir desquelles sont produites les huiles sont soit des graines, soit des fruits. En fait, toutes les graines et tous les fruits contiennent de l'huile; mais seuls sont appelés oléagineux ceux qui servent à produire industriellement de l'huile et qui sont cultivés pour cela.

Parmi les graines de plantes cultivées pour leur huile, les plus connues sont : l'arachide, le colza, le ricin, le soja, le tournesol. Il faut y ajouter les graines de plantes cultivées pour fournir des fibres textiles -et subsidiairement de l'huile : coton et lin, principalement. Quant aux fruits oléagineux, ils proviennent principalement du Cocotier (noix de coco contenant le coprah), du Noyer, du Palmier à huile (palme et palmiste) et de l'Olivier.

Les huiles peuvent se diviser en 4 grands groupes, un indice (indice d'iode*) servant à les discriminer:

- les huiles dites saturées: coprah, palme,... Indice d'iode de 5 à 50.
- les huiles monoinsaturées (semi-siccatives) : olive, arachide, colza,... Indice d'iode de 50 à 100.
- les huiles di-insaturées (semi-siccatives): tournesol, soja, maïs,... Indice d'iode de 100 à 150.
- les huiles tri-insaturées (siccatives) : lin, bois de chine,... Indice d'iode supérieur à 150.

Plusieurs indices décrivent les caractéristiques chimiques des oléagineux :

- indice d'iode
- indice de saponification
- indice d'acide (ou acidité)
- indice de peroxyde

(*) plus l'indice d'iode est élevé (figure suivante) plus l'huile est insaturée (nombre de doubles et triples liaisons).

Insaturée, l'huile est siccative, peu résistante à l'oxydation, de viscosité élevée.

Saturée, elle résiste à l'oxydation, est peu visqueuse mais son point de fusion est élevé, elle est souvent solide aux températures ambiantes de nos climats.

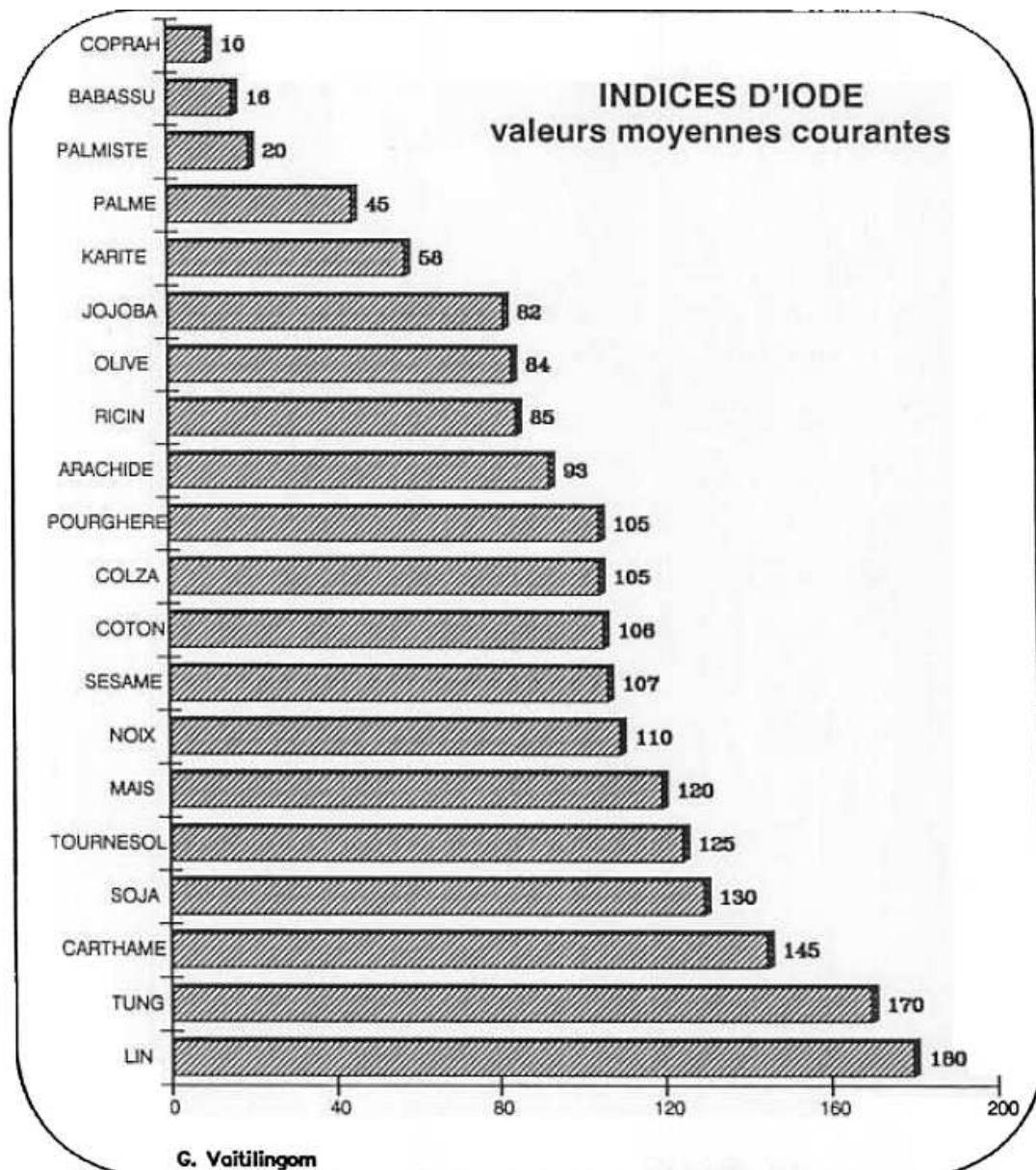


Figure 2 : indice d'iode de 20 huiles végétales.

La composition chimique des huiles végétales brutes correspond dans la plupart des cas à un mélange de 95 % de triglycérides et 5 % d'acides gras libres, de stérols, cires et impuretés diverses.

Les triglycérides sont des tri-esters formés par la réaction d'acides gras sur les trois fonctions alcools du glycérol.

La composition chimique de chaque huile s'exprime en % d'acides gras sur les acides gras totaux combinés dans l'huile. Un extrait de ces compositions est donné pour 7 huiles dans le tableau 1.

Désignation ¹	Doubles liaisons		Nom de l'acide	Colza	Coprah	Coton	Lin	Palme	Soja	Tournesol
	Nombre	Position ²								
C6:0	0		Caproïque	-	0-5	-	-	-	-	-
C8:0	0		Caprylique	-	5-10	-	-	-	-	-
C10:0	0		Caprique	-	5-10	-	-	-	-	-
C12:0	0		Laurique	-	45-50	-	-	0,1	-	-
C14:0	0		Myristique	-	18-20	0,5-1	-	1	-	-
C16:0	0		Palmitique	5	8-10	22-26	6-7	42-48	7-10	5-7
C18:0	0		Stéarique	1-2	1-3	1-3	3-6	5-6	3-6	3-5
C20:0	0		Arachidique	0,5	-	0,2-0,4	0,2	0,3	0,4	0,6-0,8
C22:0	0		Bénéhique	0,2	-	0,2	0,2	-	0,5	0,6-0,8
C24:0	0		Lignocérique	-	-	-	-	-	-	-
C16:1,n-7	1	9	Palmitoléique	0,2	0,2	0,6-14	0,1	0,2	0,2	0,1-0,3
C18:1,n-9	1	9	Oléique	58	5-7	18-24	17-26	36-45	22	22-50
C18:2,n-6	2	9,12	Linoléique	22	tr-4	46-54	13-16	6-10	55	40-68
C18:3,n-3	3	9,12,15	α -Linoléique	8-10	-	0,2	45-58	0,2	8	0,2
C18:3,n-6	3	6,9,12	γ -Linoléique	-	-	-	-	-	-	-
C18:3,n-3	3	9,11,13	Eléostéarique	-	-	-	-	-	-	-
C20:1,n-9	1	11	Gadoléique	-	-	-	-	-	-	-
C22:1,n-9	1	13	Erucique	1	-	-	tr	-	-	-
C24:1,n-9	1	15	Nervotique	-	-	-	-	-	-	-

1 - Le nombre avant les deux points indique le nombre total d'atomes de carbone, les chiffres après les deux points le nombre de doubles liaisons. Lorsque la ou les positions de ces doubles liaisons sont connues, on indique celle de la plus proche du groupement méthyle, pris comme carbone 1.

2 - Les chiffres indiquent la ou les positions des doubles liaisons numérotées à partir du groupement carboxylique, pris comme carbone 1.

Tableau 1 : acides gras rencontrés dans les huiles végétales et composition de 7 d'entre elles [19].

Caractéristiques physiques:

Les propriétés physiques généralement prises en compte sont présentées dans le tableau 2.

- la densité
- la viscosité :
La viscosité des acides gras et des triglycérides est liée à leur structure, plus particulièrement à la longueur de leur chaîne et à leur degré d'insaturation. Les triglycérides sont plus visqueux que les acides qui les composent.
- l'indice de réfraction:
L'indice de réfraction est une constante caractéristique des corps gras, il est en relation avec l'insaturation.
- le point de fusion
- le point de trouble
- le point éclair:
On appelle point d'éclair la température à laquelle se produit, en présence d'une flamme, l'inflammation nette des vapeurs d'une huile que l'on chauffe graduellement dans des conditions déterminées.
Le point de feu ou point de combustion est la température à laquelle l'huile chauffée au contact de l'air prend feu et brûle au moins pendant 5 secondes.
- le pouvoir calorifique.

	DENSITE A 20C	VISCOSITE (cSt) A 20C	POINT DE FUSION (C)	POINT DE TROUBLE (C)	POINT ECLAIR (C)	PCI MJ/kg (kcal/kg)
ARACHIDE	0.914	85	0/-3	9	258	39.33 (9410)
BABASSU	0.946		24/26	26	234	35.22 (8425)
CARTHAME			-13/-18			
COLZA	0.916	77	0/-2	-11	320	37.40 (8956)
COPRAH	0.915	30-37	23/26	20-28		37.10 (8875)
COTON	0.921	73	2/-2	-1	243	36.78 (8800)
JOJOBA						
KARITE	0.915		23/45	34		37.70 (9019)
LIN	0.940	45-50	-20			
MAIS		60-64	-10/-12			
NOIX						
OLIVE	0.914	80-95	0/-3			
PALME	0.915	95-106	23/50	31	280	36.92 (8834)
PALMISTE			24/26			
PURGHERE	0.920	55			260	38.85 (9295)
RICIN	0.955	850-1100	-10/-12		265	37.20 (8900)
SESAME	0.922		0/-5			
SOJA	0.920	58-63	-20/-23	-4	330	37.30 (8925)
TOURNESOL	0.925	55-61	-16/-18	-5	316	37.75 (9032)
TUNG			4			

Tableau 2 : caractéristiques physiques de 20 huiles végétales [20].

Corps étrangers contenus dans les huiles végétales ou composés minoritaires.

Un certain nombre d'impuretés et d'altérations sont prises en compte lors des traitements industriels, la présence de ces corps étrangers peut prendre de l'importance lors de l'usage carburant des huiles végétales. Ces corps entrent généralement pour moins de 2 % dans le contenu d'une huile, ce sont principalement :

- eau et matières volatiles
- impuretés ou sédiments
- cendres
- mucilages
- savons
- acides gras libres.

Considérés implicitement ou explicitement lors des traitements industriels, on verra que ces corps étrangers prennent de l'importance lors de l'usage carburant des huiles végétales.

En tant que produit industriel, chaque type d'huile végétale est désigné par une composition chimique et des indices caractéristiques différents.

L'objectif de la recherche est de vérifier si ces particularités se retrouvent lors du fonctionnement dans les moteurs diesels.

Et, si tel est le cas, de dégager une différenciation des huiles végétales en établissant les liens entre leurs caractéristiques et leurs propriétés en tant que carburant.

Nous pourrions alors contribuer à définir les conditions de fonctionnement correct des moteurs pour chaque huile, en relation avec des éléments établis dans une perspective d'usage carburant.

3.1.2 Etude des liens entre la composition des huiles végétales et le délai d'inflammation en moteur Diesel.

Huit huiles végétales courantes ont été choisies pour mener cette étude. Leurs caractéristiques recouvrent en grande partie l'ensemble des oléagineux recensés dans le monde [8].

ARACHIDE, COLZA, COPRAH, COTON, LIN, PALME, SOJA, TOURNESOL

Certaines sont brutes, d'autres sont neutralisées et dégommees, d'autres sont raffinées. Il y a des huiles acides, des huiles alimentaires et non alimentaires.

L'inflammation est une phase importante pour la combustion qui reste le phénomène recherché, dès que l'on utilise un carburant dans un moteur.

Dans un moteur Diesel, le carburant injecté dans la chambre doit s'auto-enflammer sous l'effet de la température obtenue par la compression d'une masse d'air.

Le délai d'inflammation est l'intervalle de temps entre le début de l'injection et le début de l'inflammation. L'indice de cétane, exprimant l'aptitude à l'auto inflammation d'un carburant, est une propriété majeure retenue dans les normes concernant les combustibles Diesel.

Le principe même de l'injection entraîne un délai physique. Les réactions chimiques, qui ont forcément lieu, peuvent être décrites par un mécanisme basé sur l'hypothèse d'oxydation en chaîne en plusieurs étapes [16]. Ceci se traduit par un délai chimique, l'ensemble délai physique et chimique pouvant se modéliser.

Mais les mécanismes qui opèrent pendant ce délai sont extrêmement difficiles à isoler à l'intérieur d'un moteur. L'approche que nous nous sommes définie implique des études dans le moteur (inflammation, combustion) et hors du moteur (évaporation). Ces travaux se sont déroulés simultanément, mais nous décrirons d'abord ceux dans le moteur.

Dans le cas de nos 8 huiles végétales:

- 1) nous ne connaissons pas de modèles de délai proposés pour les huiles végétales dans le moteur,
- 2) le comportement global dans le moteur, était controversé dans les publications (délai plus court ou plus long que les fuels),
- 3) Il avait été observé que la formation de dépôts devait être réduite avec des huiles à moindre degré d'insaturation si l'atomisation des gouttelettes était correcte [13].

Afin de dégager des différences de délais d'inflammation entre les huiles végétales, il était nécessaire d'utiliser un moteur « sensible » ou exigeant vis-à-vis du carburant injecté et qui permette de varier les conditions de pression et température au moment de l'injection. Un moteur CFR, utilisé pour la détermination de l'indice de cétane (EN ISO 5165) aurait pu remplir ce rôle.

Le Professeur Andrzej Sapinski du Laboratoire de Machines Thermiques (M.E.L.) de l'Institut Polytechnique de Varsovie, possédait un moteur MWM monocylindre expérimental à chambre séparée (injection indirecte) équipé d'un dispositif permettant de faire varier les paramètres physiques de l'air d'admission. Il comprend :

- Un réchauffeur d'air électrique ajustable permettant d'atteindre une température maximale de l'air d'admission de $T_a = 210\text{C}$.
- Une perte de charge ajustable intégrée dans la tubulure d'admission permettant de réduire la masse d'air admise et par conséquent les valeurs de température et de pression régnant dans la chambre de combustion pendant la compression.

Ce moteur se montre très sensible à la fois aux types de carburants et aux conditions de pression et de température rencontrées au moment de l'injection.

Pour mesurer le délai d'inflammation, il s'agit de déterminer l'intervalle en temps, ou en angle vilebrequin, compris entre le début de l'injection et le début de la combustion. Le début de l'injection est généralement déterminé par le début de la levée de l'aiguille de l'injecteur. Pour déterminer la position du début de la combustion, nous avons utilisé le délai de montée rapide en pression. La position du début de la combustion est déterminée par le point d'inflexion qui sépare la compression de la combustion de pré-mélange.

Cette méthode n'est utilisable de manière fiable que sur les moteurs présentant une phase de combustion de pré-mélange suffisamment importante. En effet, sur les moteurs qui présentent une phase de combustion de pré-mélange peu importante, la transition entre la compression et la combustion n'est pas très nette.

Deux formes de modèles du délai séparant délai physique et délai chimique ont été utilisées :

- Délai physique constant, pris dans des valeurs : $\tau_p = 0,3 \text{ à } 0,5 \text{ ms}$

$$\tau(ms) = \tau_p + A.P^{-n}.e^{\left(\frac{E}{RT}\right)} \quad (1)$$

- Délai physique variable [41] :

$$\tau(ms) = \tau_{phys}(P, T) + A.P^{-n}.e^{\left(\frac{E}{RT}\right)} \quad (2)$$

Lors de ces essais, nous avons mesuré le délai de montée en pression rapide. Pour chaque valeur de température de l'air d'admission (25°C, 85°C, 160°C, 210°C), nous avons relevé le délai d'inflammation pour plusieurs valeurs de perte de charge à l'admission en partant de la valeur de perte de charge la moins importante. Les conditions d'essais sont décrites dans le tableau 3. On notera que la quantité de carburant injectée par cycle est faible (excès d'air important), La combustion devait par conséquent être dominée par une phase de combustion de pré-mélange.

MOTEUR	MWM - BASF monocylindre à chambre séparée Cylindrée = 851 cm ³ A x C = 95 x 120 mm Taux de compression = 17.2
	CONDITIONS EXPERIMENTALES
Régime	980 tr/mn,
Quantité injectée	20 mm ³ /coup
Avance dynamique à l'injection	20 Degrés Vilebrequin

Tableau 3 : Conditions d'essais du moteur MWM.

Les résultats ont été significatifs comme l'indique la figure 3 suivante.

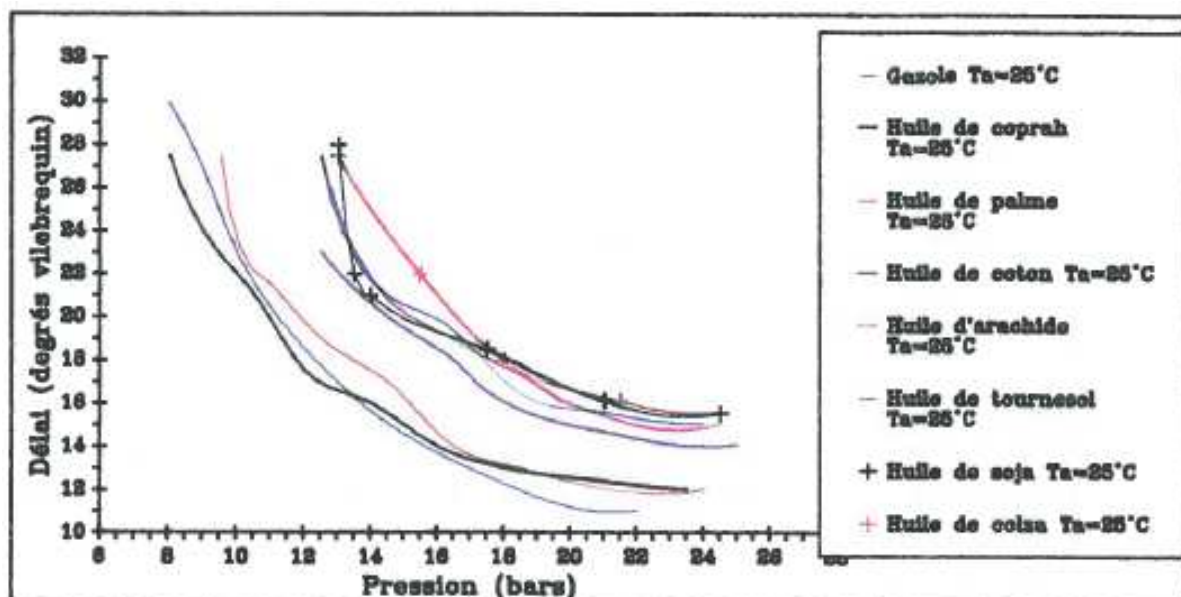


Figure 3 : délais d'inflammation en fonction de la pression en début d'injection pour le gazole et 7 huiles végétales [20].

Deux des 8 huiles, coprah et palme, présentaient une évolution du délai d'inflammation proche du gazole. Un autre groupe comprenant : arachide, tournesol, soja et colza montrait une similitude de comportement avec des délais nettement plus élevés que le gazole. L'huile de coton se situant entre ces deux groupes.

Une forme de l'équation (1) s'est montrée suffisante pour obtenir de bonnes régressions des points mesurés :

$$\tau = a + b.e^{(c.P)} \quad (1')$$

La figure 4 donne les formes de régressions obtenues à partir de l'équation (1').

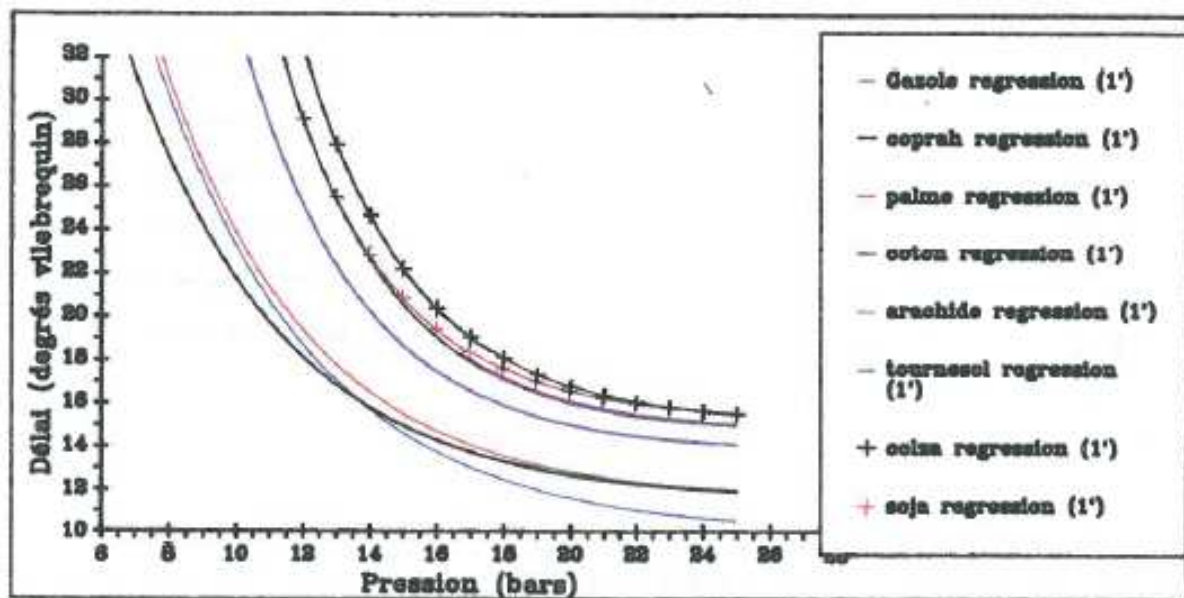


Figure 4 : régressions obtenues à partir de l'équation (1') des délais d'inflammation en fonction de la pression en début d'injection pour le gazole et les 7 huiles végétales.

Au vu des deux figures précédentes, on voit que les huiles s'individualisent bien les unes des autres. Il est également possible d'établir un classement par ordre de grandeur croissant des délais d'inflammation :

1. Coprah
2. Palme
3. Coton
4. Arachide
5. Tournesol
6. Soja
7. Colza

(Note : l'huile de lin n'a pas été testée)

Grâce à l'abaque suivant (fig. 5) donnant la correspondance entre le délai et l'indice de cétane on a pu établir des valeurs d'indices mesurés dans les conditions d'essais de ce moteur.

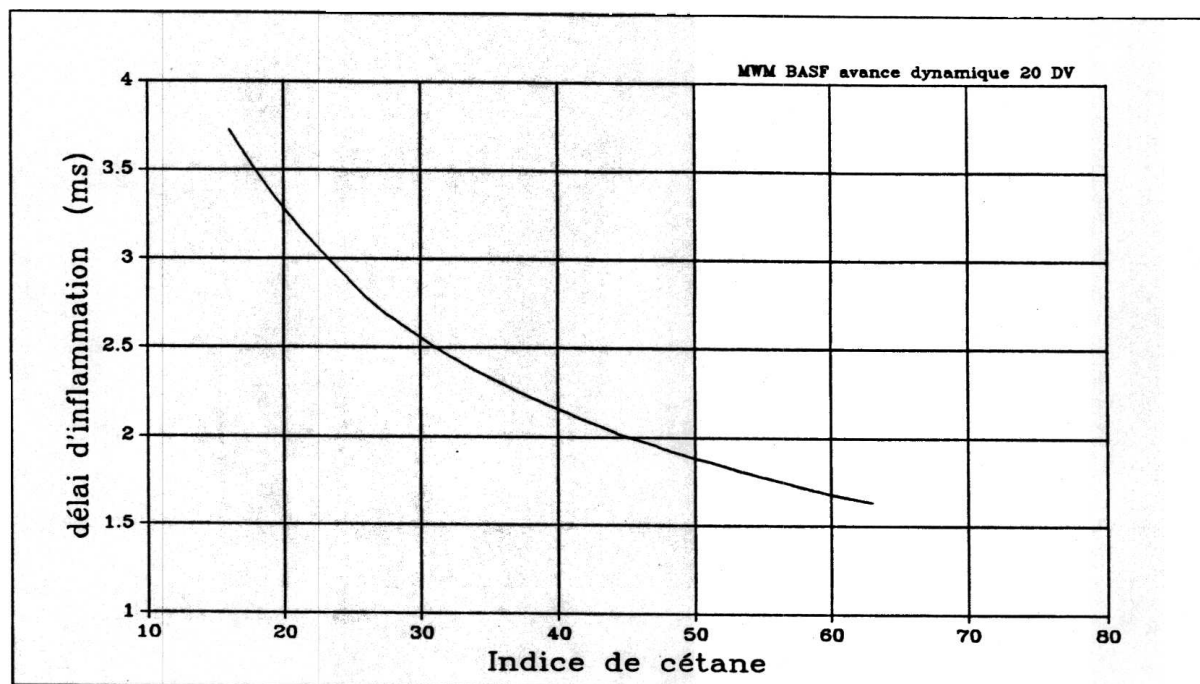


Figure 5 : relation entre indice de cétane et délai d'inflammation respectée par le moteur MWM.

	INDICE DE CETANE
COPRAH	43
PALME	39
COTON	34
TOURNESOL	30
ARACHIDE	30
SOJA	29
COLZA	29
GAZOLE	49
Ester Méthylique de Colza	52

Tableau 4 : indices de cétane déterminés grâce au moteur MWM BASF pour les huiles végétales, le gazole et l'ester méthyliques de colza.

Ces valeurs d'indice recoupent celles rencontrées dans les publications. On s'aperçoit que, dans les conditions d'essais employées, les huiles sont très personnalisées : il y a

une différence notable de comportement en entre l'huile de coprah et les huiles de soja et de colza.

Etude de corrélation entre compositions en acides gras et délais d'inflammation.

Parfois évoqué, voire effleuré, dans les articles, le degré d'insaturation semblait être un paramètre influant sur la décomposition thermique et la polymérisation des huiles végétales. Les lipochimistes que j'avais interrogé, posaient a priori l'aptitude à l'inflammation (soit, par conséquence, le délai) croissante avec le degré d'insaturation des huiles. Mais nos résultats précédents indiquaient au contraire exactement l'inverse (voir tableau 5).

TYPE D'HUILES	INDICES	
	IODE	CETANE
COPRAH	17.6	43
PALME BRUTE	49.5	42
COTON	99	34
ARACHIDE	98.6	30
TOURNESOL	132	30
SOJA	134	29
COLZA	117.6	29
GAZOLE	-	49

Tableau 5 : indice d'iode et de cétane de 7 huiles végétales [20].

Rappelons que plus l'indice d'iode est élevé plus l'huile est insaturée (nombre de doubles et triples liaisons).

L'explication de cette hypothèse « lipochimique » à contre courant des résultats en combustion sera explicitée plus tard lors des travaux de thèse de N. Chirat [19]. Pour les chimistes des huiles, la tendance à l'oxydation est un facteur important agissant sur la stabilité des produits, et également un critère de qualité soit négatif lors, par exemple, des transformations alimentaires, soit positif pour l'industrie des polymères et peintures.

On retrouvera ce critère de stabilité à l'oxydation comme un élément essentiel des normes encadrant la qualité des Biodiesel ou des huiles végétales terrestres ou marines utilisées comme carburant.

Il apparaissait déjà que les huiles insaturées étaient non seulement propices à des polymérisations ou des dégradations thermiques mais également présentant les moins bonnes aptitudes à l'auto-inflammation.

J'ai tenté alors d'établir des corrélations entre la composition détaillée des huiles végétales et leur aptitude à l'auto-inflammation.

J'ai tout d'abord étudié l'action des composés majoritaires avant d'examiner l'influence des composés minoritaires.

Les composés majoritaires sont les triglycérides et chaque huile possède une « signature » propre représentée par sa **composition en acides gras**.

Le tableau 6 indique la composition en acides des huiles testées.

%	fatty acid	Arachide	Colza	Coprah	Coton	Palme	Soja	Tournesol
Saturated total		15.2	7.4	87.9	26.2	57.4	15.0	12.5
C6:0	Caproic	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
C8:0	Caprylic	0.0	0.0	6.8	0.0	0.0	0.0	0.0
C10:0	Capric	0.0	0.0	5.8	0.0	0.0	0.0	0.0
C12:0	Lauric	0.0	0.0	46.5	0.0	0.1	0.0	0.0
C14:0	Myristic	0.0	0.0	16.4	0.7	1.2	0.0	0.1
C16:0	Palmitic	9.8	5.0	9.5	23.0	49.5	10.5	6.5
C18:0	Stéaric	2.5	1.8	2.4	2.2	6.3	3.6	4.5
C20:0	Arachidic	1.6	0.6	0.1	0.2	0.3	0.4	0.3
C22:0	Behenic	1.3	0.0	0.0	0.1	0.0	0.5	1.1
C24:0	Lignoceric	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Monounsaturated total		51.4	59.2	6.9	20.1	35.9	23.1	27.2
C16:1,n-7	Palmitoleic	0.4	0.2	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0
C18:1,n-9	Oleic	50.3	58.0	6.9	19.5	35.9	22.2	26.9
C20:1,n-9	Gadoleic	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
C22:1,n-9	Erucic	0.7	1.0	0.0	0.0	0.0	0.9	
C24:1,n-9	Nervonique	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Polyunsaturated total		33.8	33.0	5.2	53.4	6.4	61.9	61.4
C16:2,n-4	hexadecadienoic	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C16:2,n-6		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C18:2,n-6	Linoleic	33.8	22.8	5.2	53.2	6.2	55.1	61.4
C16:3,n-3	Hexadecatrenoic	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C18:3,n-3	α-Linolenic	0.0	10.0	0.0	0.2	0.2	6.8	0.0
C18:3,n-6	γ -Linolenic	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C18:3,n-5	α -Eleostearic	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C20:4,n-6	Arachidonic	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C20:5, n-3	Eicosapentanoic (EPA)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C22:6,n-3	Docosahexanoic(DHA)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tableau 6 : composition en acides gras des huiles végétales testées.

Le grand nombre des acides gras et la classification traditionnelle de ceux-ci nous ont conduits à les regrouper de façon plus synthétique et plus souple pour la recherche de corrélations :

- 1) l'ensemble des acides gras saturés.
- 2) l'ensemble des acides gras monoinsaturés.
- 3) l'ensemble des acides gras di-insaturés.
- 4) l'ensemble des acides gras tri-insaturés.

Parmi les autres caractéristiques, nous avons introduit dans notre analyse l'indice d'iode qui est couramment utilisé pour classer les huiles végétales.

Enfin, dans l'objectif d'employer une approche statistique des corrélations cherchées, nous avons établi un certain nombre de variables calculées par croisements des caractéristiques de base.

La liste complète des variables utilisées lors de l'étude est la suivante :

DEL : délai d'inflammation dans le MWM BASF, Ta = 25°C
SAT : total des % d'acides gras saturés
MONO : total des % d'acides gras mono insaturés

DI	: total des % d'acides gras di insaturés
TRI	: total des % d'acides gras tri insaturés
DIT	: somme des % di et tri insaturés
SAM	: somme des % saturés et mono insaturés
SAD	: somme des % saturés et di insaturés
STT	: somme des % saturés et tri insaturés
SA	: différence saturés -tri insaturés
MOD	: somme des % mono et di insaturés
MS	: rapport MOD/STT
MT	: rapport MOD/SA
POL	: rapport DIT/SAT (polyinsaturés/saturés)
SST	: rapport SAT/TRI
CLI	: exemple de calculs $5 \times \text{SAT} - 2 \times \text{TRI}$
IODE	: indice d'iode
ACIDITE	: acidité de l'huile

Les « individus » sont ici les huiles végétales testées.

Méthode utilisée :

La corrélation que nous avons cherché à dégager a fait intervenir :

- d'un côté, les variables propres aux caractéristiques chimiques de chaque huile citées plus haut,
- de l'autre, le délai d'inflammation mesuré pour une pression identique au moment de l'injection.

Nous avons utilisé la méthode d'analyse en composantes principales (ACP).

L'ACP est une méthode statistique essentiellement descriptive : son objectif est de présenter, sous une forme graphique, le maximum de l'information contenue dans un tableau de données [17].

Résultats :

La figure 6 présente le cercle des corrélations des variables, elle indique une forte dépendance entre le délai DEL et le pourcentage d'acides gras saturés SAT. Ces deux variables sont par ailleurs bien représentées dans les deux axes choisis.

On peut conclure à une corrélation forte entre ces variables.

On remarque la direction opposée des deux vecteurs, ce qui signifie que plus la saturation SAT augmente plus le délai DEL diminue.

L'étude des individus dans le plan principal a confirmé cette relation, aucun individu ne faisant exception. Un classement a pu être établi,

1. Coprah (cop)
2. Palme (pal)
3. Coton (cot)
4. Arachide (ara)
5. Tournesol (tou)
6. Soja (soj)
7. Colza (col)

On retrouve le classement établi précédemment issu des résultats d'essais au banc moteur.

Mais nous avons ainsi déterminé qu'il existe bien une corrélation entre le pourcentage d'acides gras saturés contenu dans une huile végétale et la valeur du délai d'inflammation mesuré dans un moteur.

Les huiles les plus saturées présentant les délais d'inflammation les plus courts.

Afin de mieux visualiser ces résultats, nous avons fait calculer et tracer par le logiciel UNIRAS les dépendances entre :

- délais
- pression au moment de l'injection
- % en acides gras saturés.

La figure 7 (UNIRAS) explicite bien les conclusions précédentes. Il semble que ce soit la présence des acides gras saturés qui tend à "diminuer" le délai d'inflammation, et non un effet de proportion relative de ces derniers par rapport aux mono, di et tri insaturés. (Remarque : l'indice d'iode, qui exprime le "degré" d'insaturation d'une huile, décrit moins bien les corrélations que les % d'acides gras eux-mêmes).

Et il y a, bien évidemment, un lien entre indice de cétane et pourcentage d'acides gras saturés.

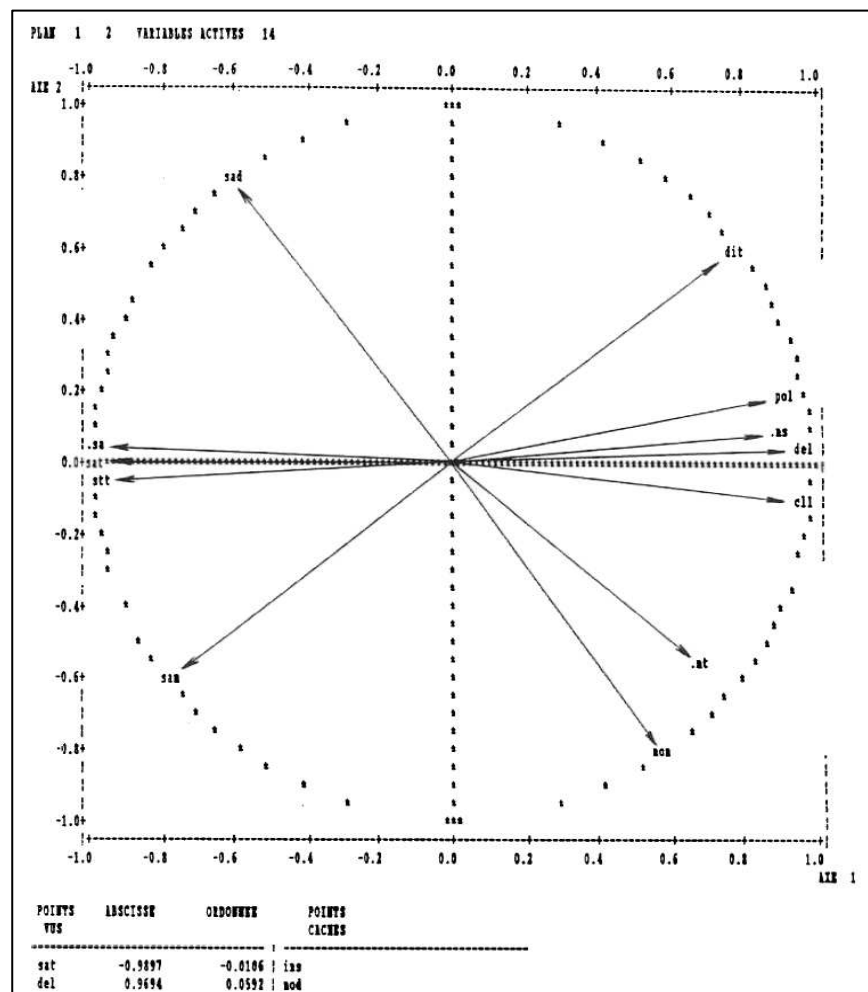


Figure 6 : cercle des corrélations dans les axes principaux 1 et 2 ; forte dépendance des variables DEL et SAT : délai et % d'acides gras saturés [20].

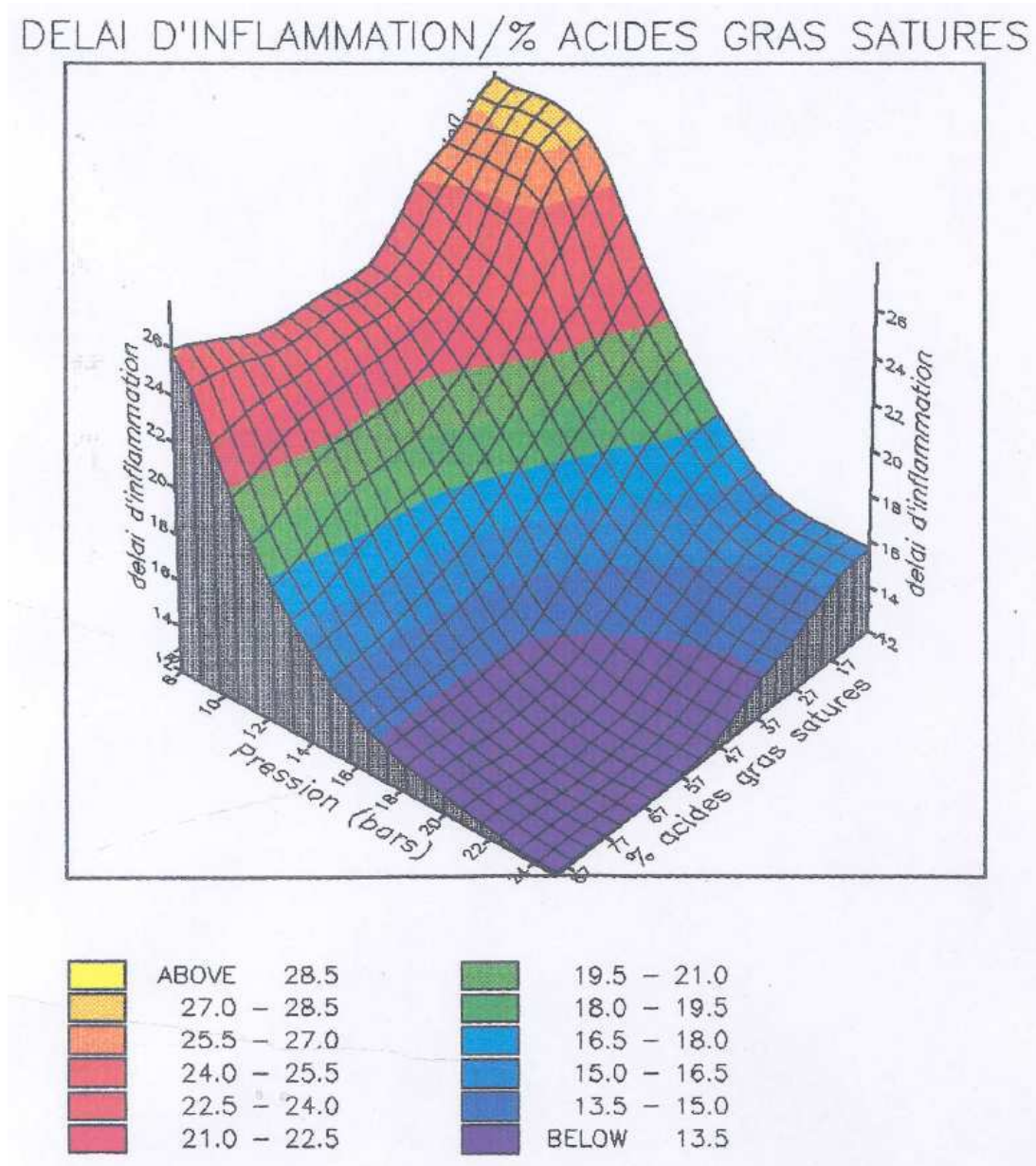


Figure 7 : représentation des dépendances entre délai d'inflammation, pression dans la chambre au moment de l'injection et % d'acides gras saturés (logiciel UNIRAS) [20].

Mais il nous a semblé nécessaire de vérifier que les conclusions précédentes sur les acides gras saturés n'étaient pas le fruit d'autres propriétés des huiles.

Par exemple, il existe une modélisation de la viscosité en fonction de l'insaturation des huiles végétales [18]. Plus l'insaturation augmente plus la viscosité augmente. Ce qui aurait pu nous conduire à une corrélation apparente entre indice de cétane bas et viscosité élevée.

Nous avons donc décidé d'augmenter et de diminuer artificiellement les % d'acides gras saturés des produits testés comme carburant.

Méthode utilisée :

Nous avons réalisé 6 mélanges d'huiles végétales venant compléter et allonger la liste des valeurs en SAT (acides saturés) des huiles naturelles. Puis nous les avons testés dans les mêmes conditions que les essais sur les mesures de délais décrites auparavant. Les mélanges (volumiques) qui ont été réalisés sont les suivants :

8. coc : 50 % coprah + 50 % coton
9. cto : 50 % coprah + 50 % tournesol
10. car : 50 % coprah + 50 % arachide
11. cos : 50 % coprah + 50 % soja
12. 7cs : 75 % coprah + 25 % soja
13. 7sc : 25 % coprah + 75 % soja

Nous avons ajouté un 7^{ème} mélange « Olé ». Ce n'est pas un mélange d'huiles végétales mais une simulation d'huile (ici de soja) dopée d'acide gras libre afin de vérifier l'hypothèse émise que les AGL avaient un effet procétane et diminuaient le délai d'inflammation.

14. Olé : 2/3 soja + 1/3 acide oléique

Résultats :

Lors des essais au banc moteur les mélanges se sont comportés de la même façon que les huiles naturelles :

- communauté de comportement avec le gazole,
- caractéristiques propres.

Les deux figures 8 et 9 suivantes illustrent l'évolution des délais mesurés en fonction de la pression au moment de l'injection.

Les régressions ont été établies selon le modèle précédemment utilisé :

$$\tau = a + b.e^{(c.P)} \quad (1')$$

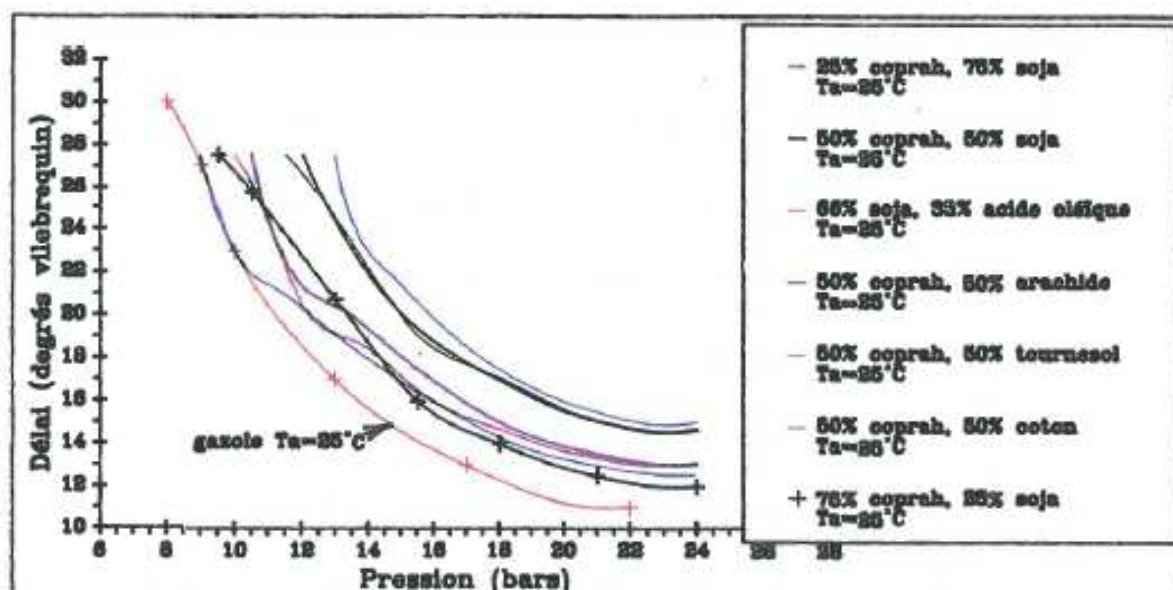


Figure 8 : délais d'inflammation en fonction de la pression au moment de l'injection (moteur MWM) – résultats pour le gazole et les 7 mélanges [20].

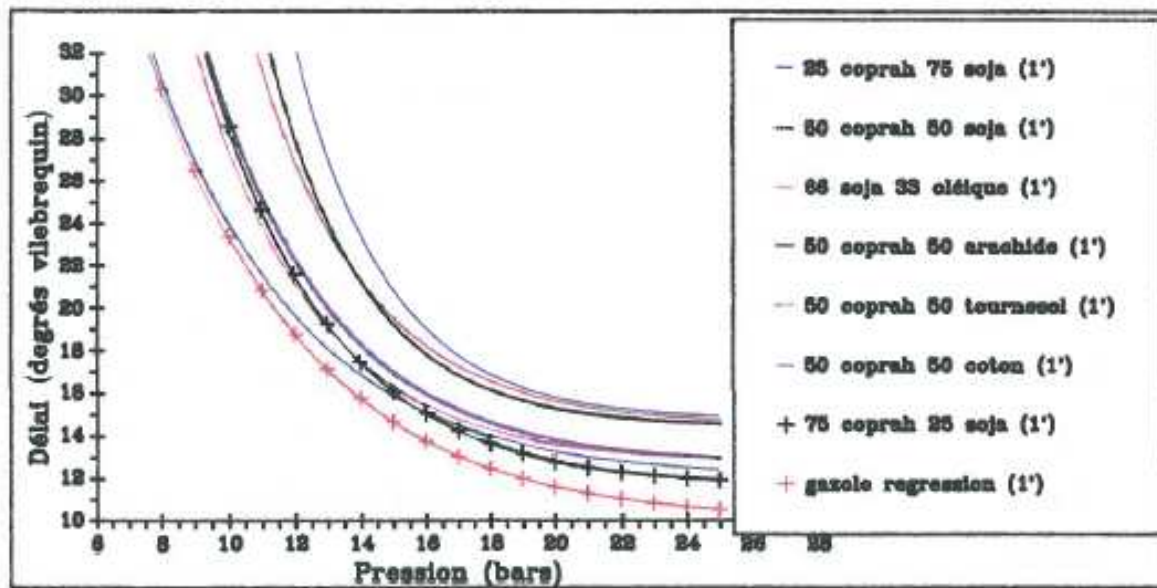


Figure 9 : régressions obtenues à partir de l'équation (1') [20].

Nous avons effectué une Analyse en Composantes Principales des 13 carburants réunis (7 huiles et 6 mélanges).

Les résultats sont en tous points comparables à ceux obtenus avec les huiles naturelles. Le cercle des corrélations des variables indique une forte dépendance entre le délai DEL et le pourcentage d'acides gras saturés SAT. Là aussi, on a remarqué la direction opposée des deux vecteurs, ce qui signifie que plus la saturation SAT augmente plus le délai DEL diminue.

L'étude des individus dans le plan principal (figure 10), conduit à un classement qui respecte un ordre décroissant d'indice de cétane mesuré avec la diminution du pourcentage d'acides saturés des 13 produits utilisés.

Le mélange « Olé » (66 % soja + 33 % acide oléique) : pour celui-ci également on remarque un comportement similaire à celui du gazole. L'acide gras libre oléique a diminué le délai d'inflammation du soja sur toute la plage de pression lors de l'injection. Ce mélange présente un indice de cétane calculé de 32 contre 29 pour l'huile de soja pure. Fig. 9, on remarque une superposition de Olé et Cos (50 coprah + 50 soja) ce dernier présentant aussi un indice de cétane de 32.

Pour Cos, l'augmentation du taux d'acides gras saturés s'est fait sous forme de triglycérides (50 % d'huile de coprah) alors que pour Olé 33 % d'acides gras libres ont suffi à lui donner un cétane de 32.

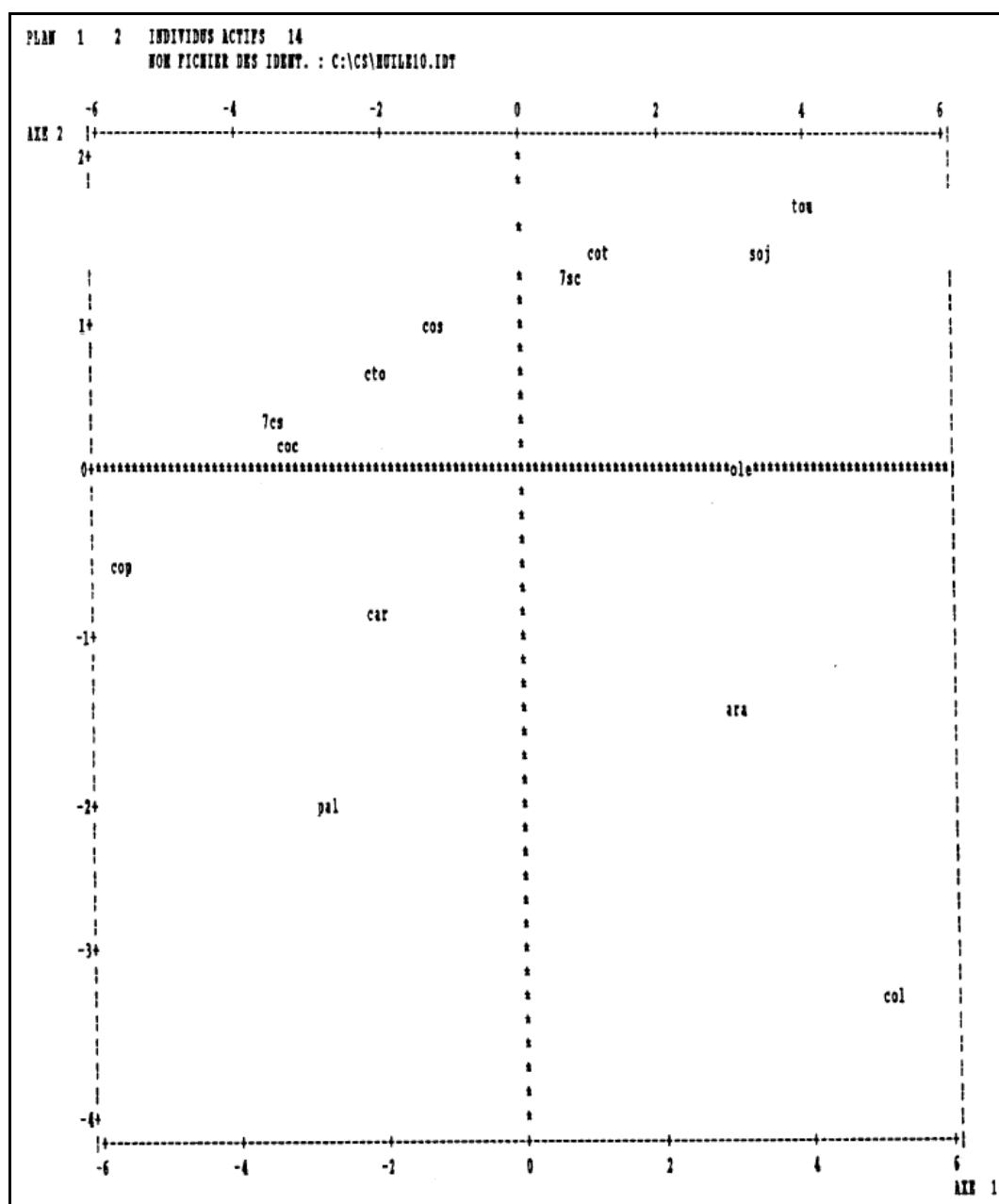


Figure 10 : représentation des individus dans le plan principal et classement selon l'ACP [20].

1. (cop) Coprah
2. (pal) Palme
3. (cot) Coton (cot)
4. (ara) Arachide (ara)
5. (tou) Tournesol (tou)
6. (soj) Soja (soj)
7. (col) Colza (col)
8. (coc) 50 % coprah + 50 % coton
9. (cto) 50 % coprah + 50 % tournesol
10. (car) 50 % coprah + 50 % arachide
11. (cos) 50 % coprah + 50 % soja
12. (7cs) 75 % coprah + 25 % soja
13. (7sc) 25 % coprah + 75 % soja
14. (olé) 66 % soja + 33 % oléique

n.3	= =>	coprah	(cop)
n.12	= =>	75 coprah 25 soja	(7cs)
n.8	= =>	50 cop. 50 coton	(coc)
n.4	= =>	palme	(pal)
n.9	= =>	50 cop. 50 tourn.	(cto)
n.10	= =>	50 cop. 50 arach.	(car)
n.11	= =>	50 cop. 50 soja	(cos)
n.13	= =>	25 cop. 75 soja	(7sc)
n.2	= =>	coton	(cot)
n.1	= =>	arachide	(ara)
n.14	= =>	66 soj. 33 oléic	(olé)
n.5	= =>	tournesol	(tou)
n.7	= =>	soja	(soj)
n.6	= =>	colza	(col)

CLASSEMENT selon l'ACP	% ACIDES GRAS SATURES	INDICE DE CETANE CALCULE
COPRAH (cop)	87.9	43
75 COPRAH 25 SOJA (7cs)	69.7	41
50 COPRAH 50 COTON (coc)	63.2	38
PALME (pal)	57.4	39
50 COPRAH 50 TOURNESOL (cto)	52.7	38
50 COPRAH 50 ARACHIDE (car)	51.6	37
50 COPRAH 50 SOJA (cos)*	51.4	32
25 COPRAH 75 SOJA (7sc)*	33.2	31
COTON (cot)	26.2	34
ARACHIDE (ara)	15.2	30
66 SOJA 33 OLEIQUE (olé)	14.4	32
TOURNESOL (tou)	12.5	30
SOJA (soj)	15.0	29
COLZA (col)	7.4	29

Tableau 7 : classement des individus issus de l'ACP comparé aux % d'acides gras saturés analysés et aux indices de cétane calculés dans le moteur MWM [20].

Modélisation des délais d'inflammation des huiles végétales en fonction de leur pourcentage en acides gras saturés.

L'objectif de ces travaux était, si cela s'avérait possible, de dégager une différenciation des huiles végétales en établissant les liens entre leurs caractéristiques et leurs propriétés en tant que carburant.

Compte tenu des conclusions précédentes nous avons essayé d'établir une modélisation des délais d'inflammation des oléagineux qui inclurait leur pourcentage en acides gras saturés.

J'ai donc recherché une équation décrivant le plus précisément possible les résultats obtenus avec les 13 "carburants" et le mélange « Olé ».

On arrive à une forme décrivant relativement correctement l'ensemble des essais dans le moteur MWM de L'institut Polytechnique de Varsovie.

$$\tau = 3.51 \cdot \left(\frac{P_i}{T_i} \right)^{0.39} \cdot \left[20 \cdot SAT^{-0.127} + 724 \cdot e^{(-0.023 \cdot SAT)} \cdot e^{(SAT \cdot 10^{-3} - 0.312) \cdot P} \right]$$

Où :

- τ : délai en degrés vilebrequin
- SAT : % en acides gras saturés de l'huile végétale testés
- P : pression au moment de l'injection en bars
- P_i : pression à l'admission en bars
- T_i : température à l'admission en °C

Ce modèle expérimental a été vérifié et donne des résultats satisfaisants. A titre d'exemple, on trouvera les courbes de délais d'inflammation pour quelques huiles et mélanges ainsi que celle de l'huile de tournesol à différentes températures d'air à l'admission.

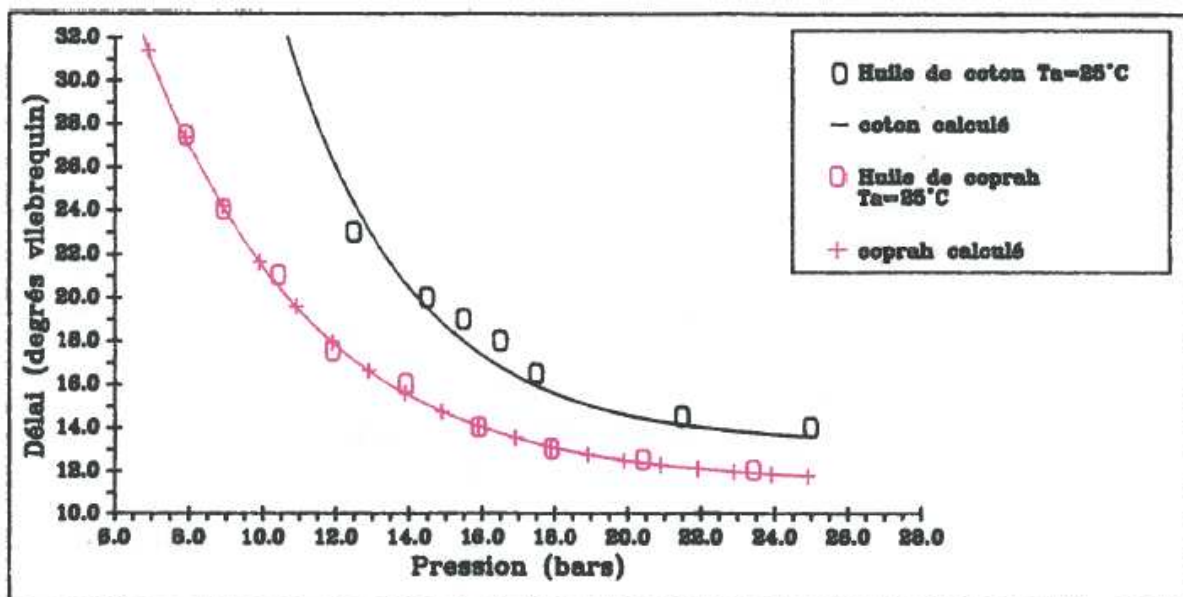


Figure 11 a : : délais d'inflammation en fonction de la pression au moment de l'injection (moteur MWM) – comparaison délais calculés/délais mesurés [20].

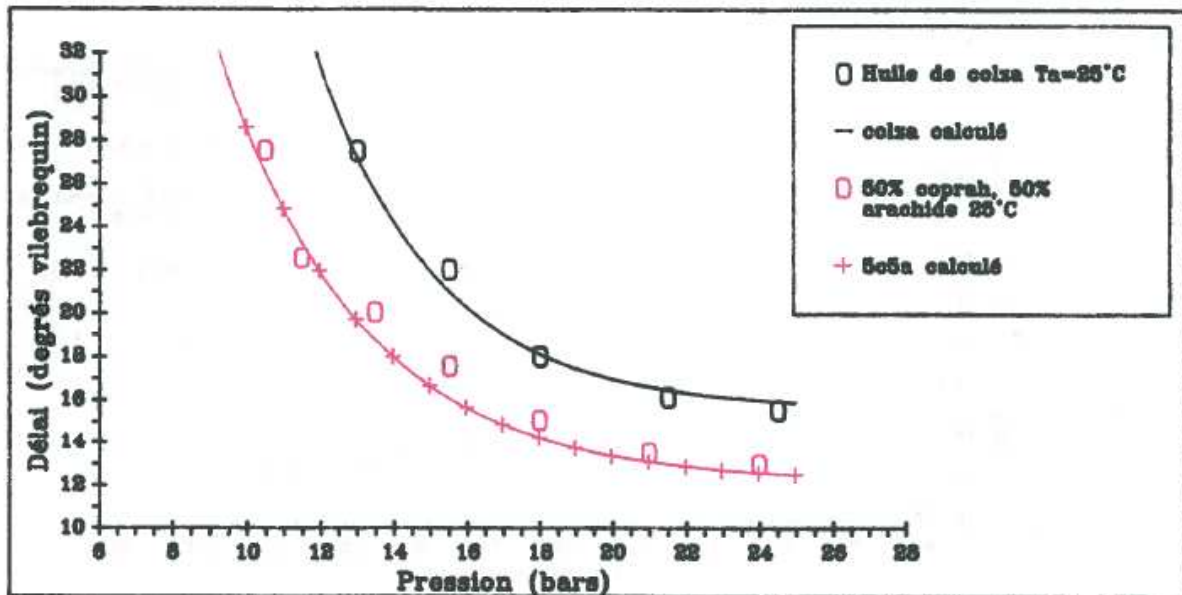


Figure 11 b : : délais d'inflammation en fonction de la pression au moment de l'injection (moteur MWM) – comparaison délais calculés/délais mesurés [20].

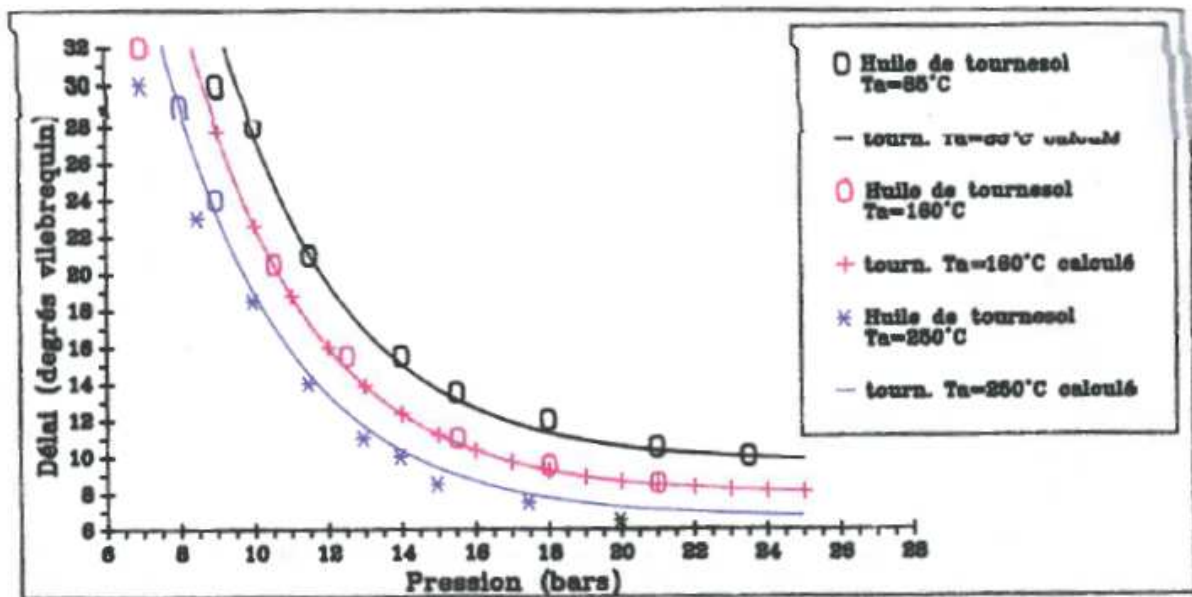


Figure 12 : délais d'inflammation en fonction de la pression au moment de l'injection (moteur MWM) – comparaison délais calculés/délais mesurés. Résultats pour le tournesol à différentes températures d'air à l'admission [20].

L'écart maximum entre l'expérience et le calcul est inférieur au degré vilebrequin, et est en moyenne inférieur à l'erreur relative sur les mesures (5 % sur les valeurs de délai en D. V.).

Il est donc possible de trouver une forme d'équation décrivant avec une précision satisfaisante les délais d'inflammation des oléagineux en général en fonction de leur pourcentage en acides gras saturés. Il faudra sans doute ajuster les coefficients selon les moteurs.

Ce résultat simplement constaté dans les publications, n'avait pas été mis en évidence à notre connaissance.

Ces travaux ont permis d'affirmer la personnalité de chaque huile végétale utilisée comme carburant et de démontrer le lien entre caractéristiques chimiques et propriétés carburant.

Il y a bien une corrélation entre le pourcentage d'acides gras saturés contenu dans une huile végétale et la valeur du délai d'inflammation mesuré dans un moteur.

Les huiles les plus saturées présentant les délais les plus courts.

Une étude plus précise pourrait mettre en évidence une relation entre indice de cétane et composition chimique des oléagineux.

Ce qui est à remarquer, c'est que l'analyse statistique en composantes principales a révélé l'absence de représentation des pourcentages d'acides gras mono, di et tri insaturés sur les délais d'inflammation, donc sur les indices de cétanes déterminés pour chacune des huiles.

On serait amené à prédire que l'initiation correcte de la combustion des huiles végétales terrestres ou marines ne dépendrait que de la présence d'acides gras saturés. Lors de l'étude par Korus et al. [13] de la polymérisation des huiles végétales, il avait été mis en évidence une certaine neutralité des acides oléiques (mono insaturés) que ce soit en termes de polymérisation oxydante ou qu'en termes de dégradation thermique. L'hypothèse que les phénomènes de formation des dépôts carbonés soient liés à la présence d'acides gras polyinsaturés (di et tri insaturés) est sans doute une voie à explorer.

Nous avons d'ailleurs, le Cirad et l'équipe ECM de PRISME/Orléans, entamé des travaux de recherche dans cette direction ¹¹.

3.1.3 Etude de l'influence des composés mineurs des huiles végétales sur le délai d'inflammation en moteur Diesel.

Suite aux travaux et aux résultats précédents et toujours dans l'optique de mieux caractériser les huiles végétales carburant, il m'est apparu indispensable d'étudier l'influence éventuelle des composés mineurs sur les délais d'inflammation.

En réalité, au cours des travaux de thèse, j'ai été souvent à la frontière de la chimie des lipides. J'ai donc défini un sujet de thèse qui impliquerait « un chimiste » et qui reprendrait les mêmes approches, jusqu'à la frontière de la thermique et de la combustion en moteur. Avec Jean Andrzejewski, nous avons obtenu, auprès de l'ADEME, le financement de la thèse de Nathalie Chirat, diplômée de l'Ecole Nationale Supérieure

¹¹ Thèse d'A. Zongo, doctorat en cours, fin en 2013. *Mécanismes de décomposition, de polymérisation des huiles végétales et adaptation d'un modèle 1D à la modélisation de la vaporisation*. Université de Ouagadougou, Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement. Cotutelle Université d'Orléans – Université de Ouagadougou, Burkina Faso.

de Chimie de Montpellier [19]. Il s'agissait, pour la doctorante, d'étudier les qualités carburant des huiles végétales mais sous l'angle de vu de la chimie.

Ces travaux ont conduit à des résultats très intéressants qui ont fait l'objet de plusieurs communications surtout chez les chimistes¹².

Les huiles végétales brutes renferment, à côté des triglycérides, des quantités parfois importantes de composés divers. Parmi ces constituants, il est possible de distinguer deux familles :

- Les produits résultant de l'altération des huiles :
 - Acides gras libres
 - Glycérides partiels
 - Produits d'oxydation

- Les constituants lipidiques des membranes :
 - Les phospholipides
 - Les cires et cérides
 - Les insaponifiables
 - Les chlorophylles et dérivés.

Le tableau 8 donne un exemple de compositions d'huiles végétales brutes.

	Coprah	Palme	Coton	Colza	Soja	Tournesol
Acides gras libres (%)			0,5 à 5			
Insaponifiable (%)	0,6 à 1,5	0,5 à 1,2	0,6 à 1,5	0,7 à 1,8	0,6 à 1,6	0,5 à 1,5
Stérols (ppm)	800 à 2300	400 à 900	3750 à 5800	5400 à 8800	2400 à 4180	3250 à 5150
Hydrocarbures (ppm)	-	1000 à 1100	800 à 1200	360 à 440	-	150 à 220
Tocophérols et Tocotriénols (ppm)	20 à 80	320 à 1000	800 à 1400	600 à 870	800 à 1670	440 à 1200
Alcools triterpéniques (ppm)	-	-	500 à 800	760 à 1080	-	-
Caroténoïdes (ppm)	-	500 à 700	-	-	-	-
Alcools aliphatiques (ppm)	-	-	-	-	-	1000
Phospholipides (%)		0,05 à 0,1	0,7 à 0,9	< 3,5	1,1 à 3,2	
Autres			Gossypol : 0,05 à 0,5			Cires : 80 à 440 ppm

Tableau 8 : exemples de compositions d'huiles végétales brutes [19].

Les constituant mineurs qui ont finalement été retenus, car ne pouvant pas être négligés, sont les acides gras libres, les phospholipides et les glycérides partiels, ces derniers étant essentiellement composés de diglycérides.

Méthodes :

A. création des « huiles modèles ».

Afin d'étudier l'influence de ces 3 composés indépendamment d'autres, une stratégie de travail innovante a dû être élaborée. Le raffinage classique n'est pas satisfaisant car il

¹² N. Chirat, D. Pioch, P. Lozano, J. Graille, G. Vaitilingom, A. Liennard, 1995. Qualité des carburants dérivés d'huiles végétales. Mise en place d'une stratégie d'étude. Journées Chevreul de Nancy, novembre 95.

peut rester des glycérides partiels en quantité non négligeable (jusqu'à 10 %). Des « triglycérides modèles » ont dû être fabriqués à partir d'huiles purifiées puis traitées pour les débarrasser de tous constituants mineurs.

Les essais de purification ont abouti à un procédé qui consiste à faire percoler de l'huile raffinée sur un lit d'adsorbant constitué d'un mélange de Trisyl 300 et de Silica gel LC (90/10 v/v) à la température ambiante. Cette filtration ou « flash-chromatographie » s'est effectuée en l'absence de solvants et sous pression d'azote.

La teneur maximum en constituants mineurs de ces TG modèles a été fixée à 0,5 %.

On est donc en présence de :

- **triglycérides modèles (TG modèles)** qui sont des produits artificiel dans le sens qu'ils n'existent pas de façon naturelle
- et **d'huiles modèles**, obtenues à partir des TG modèles en incorporant des quantités contrôlées de constituants mineurs.

Le tableau 9 indique l'influence de la purification effectuée sur la composition chimique des TG modèles.

	Colza		Coprah		Coton		Lin		Palme		Soja		Tournesol	
Passages sur silice	1		1		3		2		1		1		2	
	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
MG (%)	tr	nd	tr	nd	tr	nd	tr	nd	tr	nd	tr	nd	tr	nd
DG (%)	1,4	0,5	1,3	0,1	3,0	nd	2,0	nd	8,4	1,0	0,8	0,3	1,5	0,5
AGL (%)	0,05	0,01	0,10	0,04	0,02	nd	nd	nd	0,06	0,005	0,02	0,01	0,04	0,03
Phosphore (ppm)	5	< 1	4	< 1	7	< 1	4	< 1	7	< 1	5	< 1	6	< 1
Sodium (ppm)	4	5	8	6	4	4	4	5	4	2	4	5	5	5
IP (meqO ₂ /kg)	0,24	0,12	0,05	0,01	1,96	0,78	4,30	2,82	0,04	0,02	2,10	1,50	3,56	2,10
Composition en AG														
C6:0	-	-	0,6	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C8:0	-	-	7,4	7,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C10:0	-	-	5,8	5,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C12:0	-	-	45,0	45,0	-	-	0,1	0,1	-	-	-	-	-	-
C14:0	-	-	17,6	17,5	0,6	0,7	1,3	1,3	-	-	0,05	0,05	-	-
C16:0	5,0	5,0	10,6	11,1	23,9	23,1	46,3	46,7	5,2	5,2	10,2	11,0	6,7	7,4
C16:1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,6	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1
C18:0	1,7	1,7	2,4	2,4	1,9	2,2	4,1	4,1	3,2	3,1	2,8	3,4	3,6	3,8
C18:1	63,5	63,2	7,3	7,5	19,0	19,0	38,0	37,9	18,7	18,0	21,9	21,8	24,9	28,2
C18:2	21,3	20,7	3,2	3,2	53,5	53,4	9,9	9,7	14,1	14,0	57,1	55,6	63,9	58,8
C18:3	6,9	7,3	-	-	0,2	0,3	-	-	58,5	59,6	7,3	7,4	0,1	-
C20:0	0,5	0,6	-	-	0,2	0,3	0,2	0,1	0,1	-	0,2	0,2	0,3	0,5
C20:1	1,0	1,2	-	-	-	0,1	-	-	0,1	-	0,2	0,2	0,3	0,4
C22:0	-	0,1	-	-	0,1	0,3	-	-	-	-	0,1	0,2	0,1	0,8

MG : monoglycérides ; DG : diglycérides ; AGL : acides gras libres ; IP : indice de peroxyde

Tableau 9 : composition des huiles végétales avant et après purification [19].

On remarque que la purification a une influence négligeable sur la composition en acides gras ce qui, compte tenu de nos hypothèses précédentes, nous permet une réelle approche de l'influence des constituants mineurs.

B. Détermination des délais d'inflammation.

Deux approches ont été employées :

- Détermination des délais dans une chambre à volume constant (CVCA) :

Ces essais ont été réalisés au Southwest Research Institute (SwRI) au sein de l'équipe *Engine & Vehicle Research Division* à San Antonio, Texas.

Un injecteur à téton injecte une quantité faible de carburant dans la chambre. La levée d'aiguille et la pression sont enregistrées afin de déterminer le délai d'inflammation.

➤ Délai d'inflammation dans un moteur à injection directe :

Les essais se sont déroulés sur les bancs de l'ESEM (devenue Polytech'Orléans) au sein de l'équipe, désormais appelée ECM, de l'institut PRISME.

Le moteur monocylindre HATZ 1D80 est stabilisé à 1700 tr/mn à une charge de 20 %. Afin d'avoir une plus grande sensibilité en matière de délai, un réducteur est placé sur l'admission d'air de façon à obtenir une pression dans la chambre de combustion de 24 bars au moment de l'injection (au lieu de 48 bars sans restriction sur l'admission).

Conclusions de l'étude :

- Il a été remarqué que la composition par classe de triglycérides (saturés, mono, di, ou tri insaturés) rendait mieux compte de l'évolution du point de trouble et de la teneur en solide que l'indice d'iode.
- Les diglycérides et les acides gras libres ont peu d'effet sur la teneur en solide ou le point de trouble.
En revanche, la présence de phospholipides a pour conséquence une augmentation de la teneur en solide (à -20°C) et du point de trouble.
- Du point de vue de la tension superficielle (influant sur la nébulisation du jet injecté dans la chambre de combustion), les huiles les mieux adaptées sont les TG de coprah (très saturés) et les huiles à teneur élevée en phospholipides liposolubles, donc peu ou pas raffinées.
- L'étude de la viscosité a permis de confirmer avec les TG modèles que les différences signalées dans la littérature d'une huile à l'autre sont le résultat de la composition en acides gras, et non de la présence éventuelle de constituants mineurs (AGL, DG ou Phospholipides).
- L'évapo-stalagmométrie (que nous détaillerons dans le paragraphe 3.1.4 suivant) indique également que la composition en acides gras a plus d'influence que celle des constituants mineurs (AGL, DG ou Phospholipides). L'évaporation est toutefois facilitée par la présence de ces derniers. Un moindre degré de raffinage ne constitue pas un handicap de ce point de vue.

Les TG modèles les plus saturés présentent les délais d'inflammation les plus faibles. Les résultats obtenus avec les TG modèles (acidité inférieure à 0,1%) ont permis de retrouver le classement établi à l'Institut Polytechnique de Varsovie confirmant que ce n'est pas le caractère acide (% d'AGL) des huiles qui est à l'origine des réductions de délais d'inflammation.

1. Coprah
2. Palme

3. Coton
4. Arachide
5. Tournesol
6. Soja
7. Colza

En conclusion, que ce soit pour les TG modèles ou les huiles modèles, les résultats obtenus en termes de délai d'inflammation dans le moteur 1D80 et dans la chambre de combustion à volume constant (CVCA) convergent :

- Les TG modèles possédant les chaînes les plus courtes et les plus saturées présentent les délais d'inflammation les plus faibles,
- Dans le cas des huiles modèles de colza, on ne note pas de différences entre son TG modèle et ses huiles modèles obtenues en incorporant successivement 5 % d'AGL, 7% de DG et 1% de Phospholipides.

Cette étude a permis de vérifier sans ambiguïté que les tendances observées en matière de délais d'inflammation devaient être attribuées à la composition en acides gras des huiles végétales et non à la présence de diglycérides (DG) ou à d'autres composés mineurs.

3.1.4 Etude de l'évaporation de gouttelettes d'huiles végétales.

L'étude « en moteur » est toujours délicate à mener et il y a souvent chez le chercheur le désir de développer d'autres méthodes d'analyses et de tests « hors moteur », simplifiant les essais et procurant un accès à plus d'informations et plus de sensibilité.

Nous avons développé, Pascal Higelin et moi-même, avec l'aide de plusieurs stagiaires de DEA, un dispositif permettant de visualiser et enregistrer l'évaporation de gouttelettes, baptisé « dispositif d'évapostalagmométrie ». Ce dispositif a fait l'objet d'une prise de brevet¹³.

Il est l'évolution des premières mesures que nous avons effectuées dans le laboratoire d'Andrzej Sapinski à l'Institut Polytechnique de Varsovie en 1988.

La description phénoménologique et la vérification de la loi en d^2 ont été décrites par Higelin dans sa thèse [27].

Elle s'exprime généralement sous la forme :

$$d^2(t) = d_0^2 - K(t - t_0)$$

Où :

d est le diamètre de la gouttelette,

d_0 son diamètre initial

K le taux d'évaporation souvent appelé constante ou coefficient d'évaporation.

Description du dispositif expérimental

¹³ J. Andrzejewski, A. Charlet, P. Higelin, A. Sapinski, G. Vaitilingom. « Procédé et dispositif de mesure de la vitesse d'évaporation et du délai d'inflammation d'un carburant liquide », Brevet français : FR53763C.

Il existe plusieurs méthodes expérimentales pour l'étude de l'évaporation et de la combustion de gouttes de combustibles liquides : la méthode de la sphère poreuse, la méthode de la goutte en chute libre et la méthode de la goutte suspendue. Nous avons choisi la méthode de la goutte suspendue.

Les premiers essais ont été réalisés avec le dispositif décrit ci-après. Il s'agit de placer la goutte dans un flux de gaz chauds (figure 13). Le flux de gaz chauds est obtenu à l'aide d'un brûleur à gaz (type Meker ou Bunsen comportant une grille en sortie) alimenté en butane. La température des gaz chauds est régulée par le réglage de la pression d'alimentation en gaz butane à l'aide d'un manodétendeur précis. La canalisation du flux de gaz chauds est effectuée grâce à un conduit de section carré (25 cm²), longue de 50 cm, placé au dessus du brûleur. Les gaz brûlés sont dilués par entrainement de l'air ambiant. Le conduit comporte une grille d'homogénéisation placée au dessus de celui-ci, et qui permet (avec la grille du brûleur) d'obtenir un champ de températures uniforme autour de la goutte et une vitesse d'écoulement uniforme et faible. La vitesse de l'écoulement, mesurée avec un tube de Pitot dans la gamme des températures étudiées (300 °C à 650 °C), est négligeable (<0,1 m/s). Grâce à une seringue, la gouttelette est suspendue à une tige de quartz de diamètre 0,2 mm. Un volet déflecteur permet de canaliser instantanément les gaz chauds soit vers l'extérieur soit vers la gouttelette.

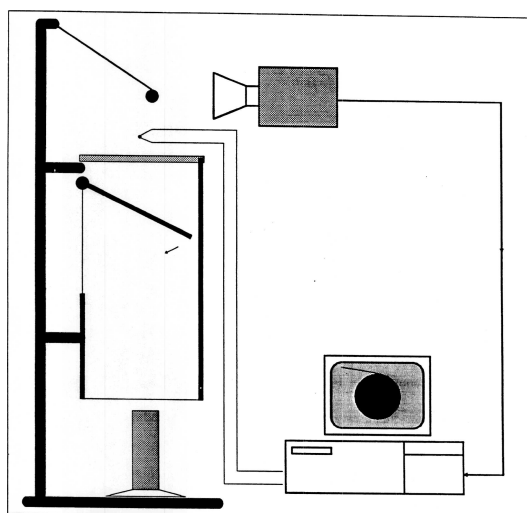


Figure 13 : schéma de l'installation du dispositif d'évaporation de gouttelettes.

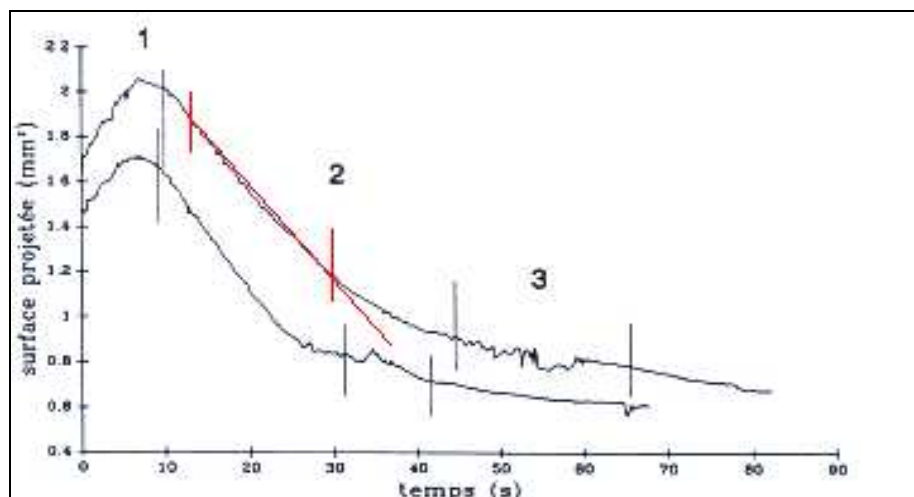


Figure 14 : Evolution de la surface projetée de deux gouttes de tournesol à 450°C. (P. Higelin, G. Vaitilingom)

Pour chaque produit, il existe une plage de température où il est possible d'observer les différentes phases de l'évaporation des gouttelettes.

- phase 1 : dilatation.
- phase 2 : évaporation établie.
- phase 3 : formation de résidus.
- En rouge : zone de détermination du coefficient d'évaporation établie.

L'objectif était d'observer les différences d'évaporation de gouttelettes des 7 huiles végétales utilisées dans les travaux sur les délais d'inflammation, ceci en comparaison avec le gazole. Était-il possible, grâce à une approche « hors moteur » de distinguer les mêmes tendances et le même classement de ces huiles ?

Résultats :

➤ influence du diamètre des gouttelettes:

La figure 15 illustre l'influence du diamètre de la gouttelette sur le temps d'évaporation total et sur les phases définies plus haut. L'évolution des surfaces est parfaitement similaire pour ces trois gouttes d'huile de palme, les températures relevées au voisinage de la goutte confirment que les conditions sont comparables. On remarque que les durées de la phase 1 (accroissement du volume) comme de la phase 2 (évaporation établie) augmentent avec la taille initiale de la gouttelette donc avec les quantités à évaporer. Des résultats identiques apparaissent pour chacune des huiles testées.

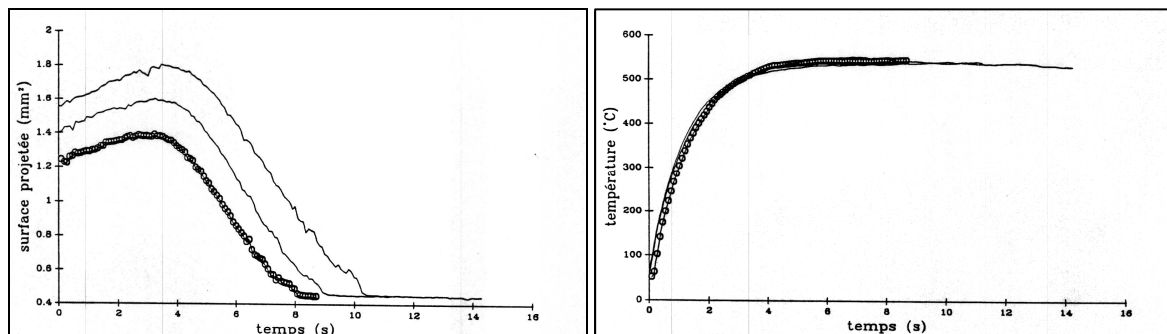


Figure 15 : évolution de la surface projetée et de la température au voisinage de la gouttelette en fonction du temps de 3 gouttes d'huile de palme [20].

➤ influence du type d'huile végétale

Pour une température finale de la veine d'air choisie telle que toutes les huiles "s'évaporent" et à diamètre initial identique, les huiles ont des temps d'évaporation et des coefficients K différents.

Si l'on ordonne celles-ci en fonction d'un de ces critères, on observe une répétabilité des résultats qui permet de les classer en termes de "rapidité d'évaporation".

Les figures 16 et 17 suivantes présentent les résultats obtenus à 540°C de température finale de veine d'air et pour deux groupes de gouttelettes de diamètre d'origine proche.

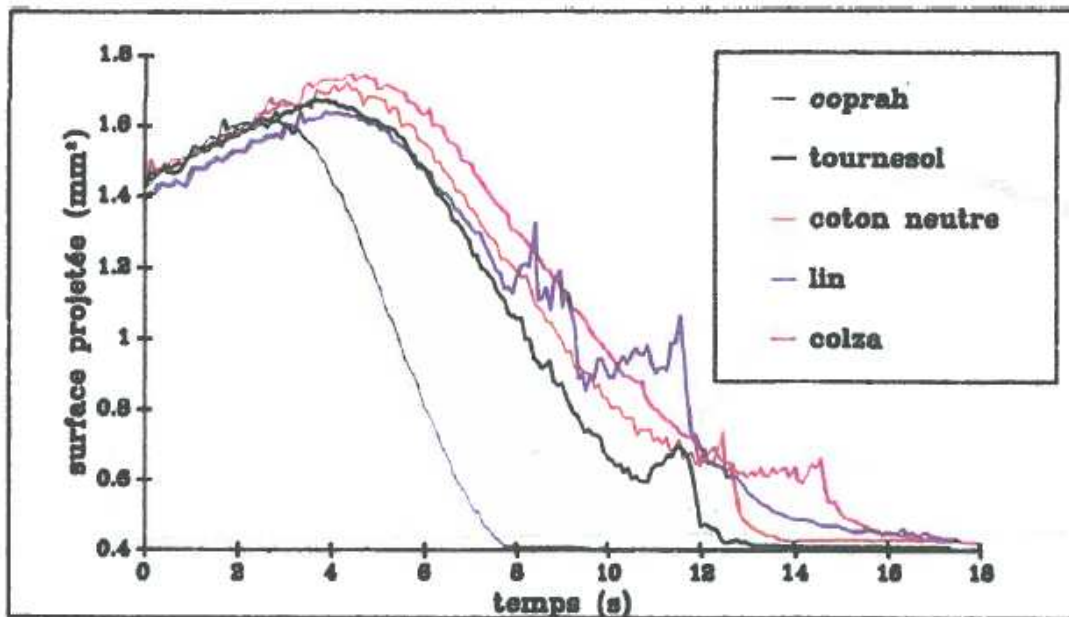


Figure 16 : évolution de la surface projetée de gouttelettes d'huiles végétales en fonction du temps - température finale 540°C [20].

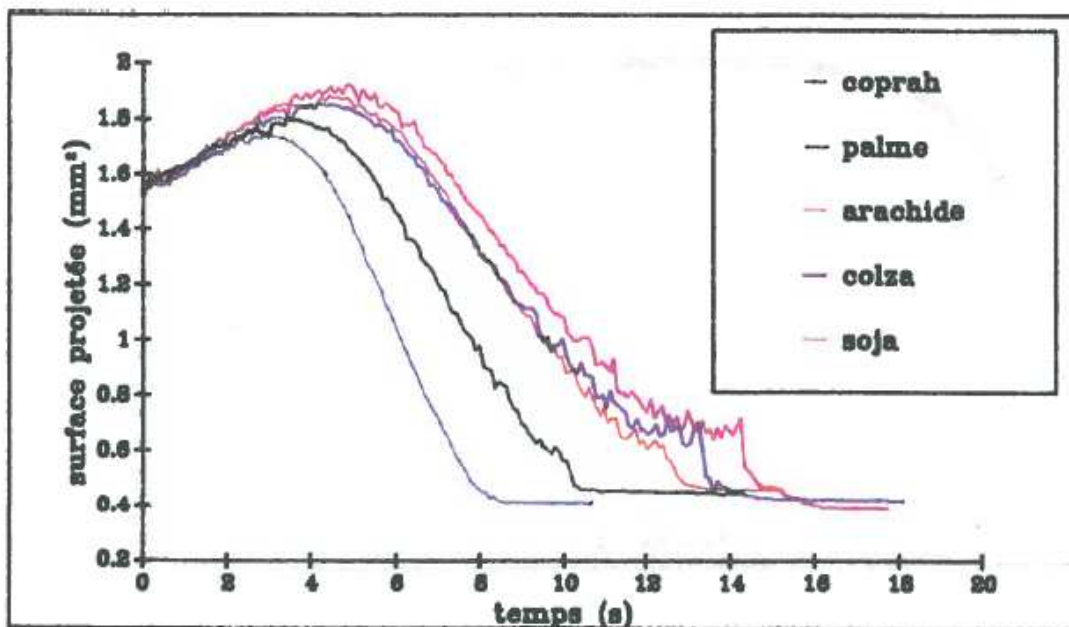


Figure 17 : évolution de la surface projetée de gouttelettes d'huiles végétales en fonction du temps - température finale 540°C [20].

Les huiles de coprah et de palme mettent significativement moins de temps pour s'évaporer que les autres. On peut établir un classement par ordre de temps total d'évaporation croissant :

- | | |
|--------------|----------|
| 1. coprah | 6. soja |
| 2. palme | 7. colza |
| 3. coton | 8. lin |
| 4. tournesol | |
| 5. arachide | |

Ce classement est globalement le même que pour ceux établis lors des déterminations de délais d'inflammation.

➤ calculs des coefficients d'évaporation des huiles végétales testées :

Les coefficients ont été déterminés sur les parties des courbes qui représentent une phase d'évaporation d'établie. Pour déterminer cette phase, on utilise le critère Kinst/Kmoy proche de 1 (figure 18) Ceci nous semble le plus convenable pour comparer ces valeurs avec celles de produits habituellement publiées. Mais les évolutions ne sont cependant pas comparables à celles des corps purs. (voir tableau 10).

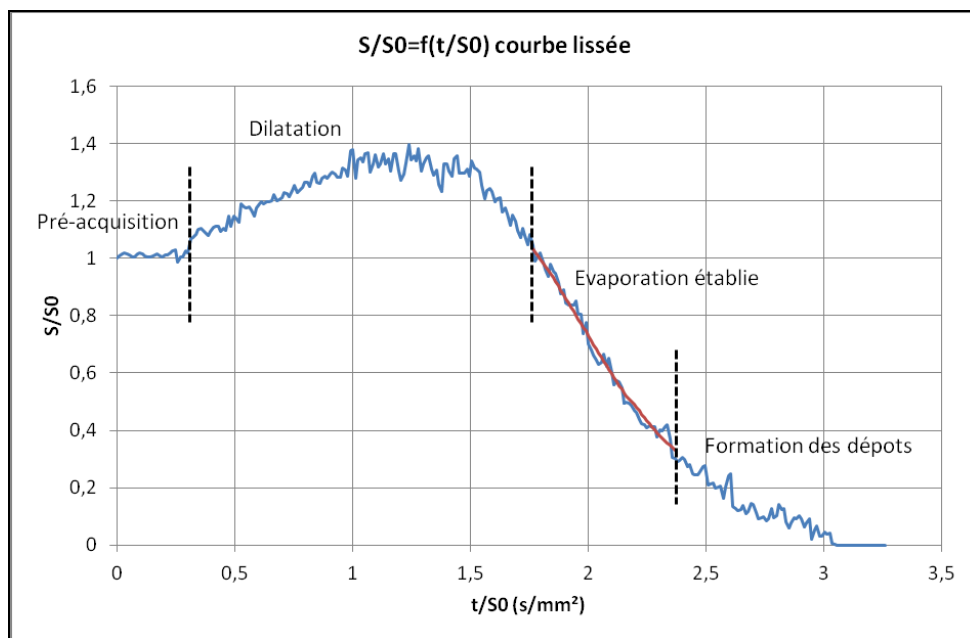


Figure 18 : détermination de la plage d'évaporation établie lors de l'évolution de la surface projetée normalisée d'une gouttelette d'huile végétale.

PRODUIT	TEMPERATURE au voisinage de la goutte [C]	- K coefficient d'évaporation [mm2/s]	vitesse de l'écoulement (m/s)	source
huile de coprah	600	0.61	1.7	
huile de coprah	520	0.42	1.7	
huile de palme	630	0.60	1.7	
huile de palme	540	0.32	1.7	
huile de coton	630	0.58	1.7	
huile de coton	530	0.26	1.7	
huile d'arachide	620	0.53	1.7	
huile d'arachide	540	0.28	1.7	
huile de tournesol	630	0.53	1.7	
huile de tournesol	520	0.26	1.7	
huile de colza	620	0.50	1.7	
huile de colza	520	0.25	1.7	
huile de soja	630	0.54	1.7	
huile de soja	520	0.25	1.7	
huile de lin	620	0.47	1.7	
huile de lin	520	0.23	1.7	
gazole	600	0.71	1.7	
gazole	800	0.83		Kobayashi [47]
gazole	700	0.74		"
essence	800	1.00		"
essence	700	0.82		"
méthanol	800	1.19		"

Tableau 10 : coefficients d'évaporation des huiles testées [20].

➤ influence de la température:

- Dans les conditions d'essais décrites, les huiles végétales se sont montrées significativement plus sensibles à la température que le gazole : plus la température de la veine d'air augmente plus les écarts de temps d'évaporation entre les différentes huiles diminuent.
- Dans la figure 19 (température finale : 630°C), on constate un "resserrement" des huiles. Un classement serait hypothétique, les écarts étant proches de ceux dus aux différences de diamètres initiaux et de températures de veine d'air.

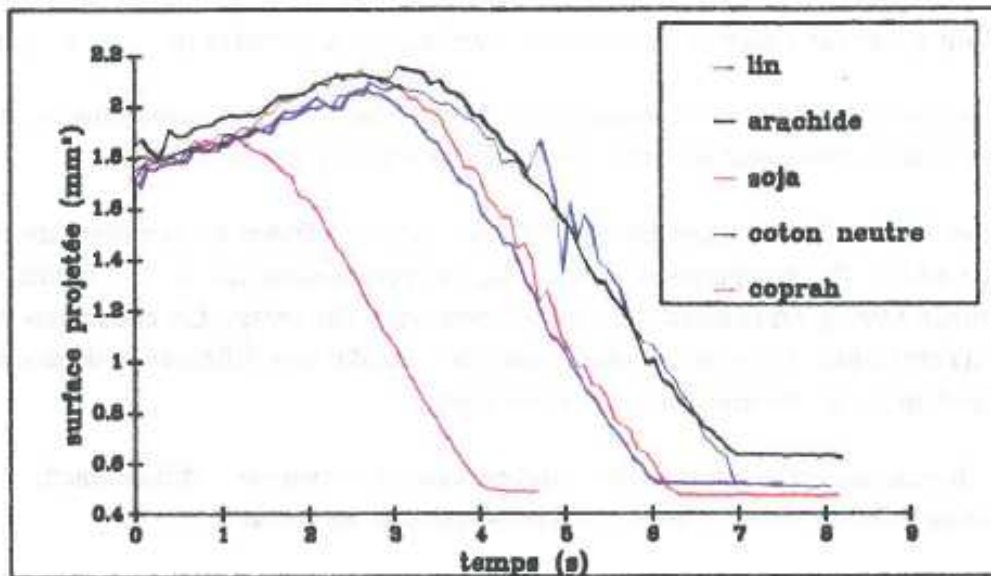


Figure 19 a : évolution de la surface projetée de gouttelettes d'huiles végétales en fonction du temps - température finale 630°C [20].

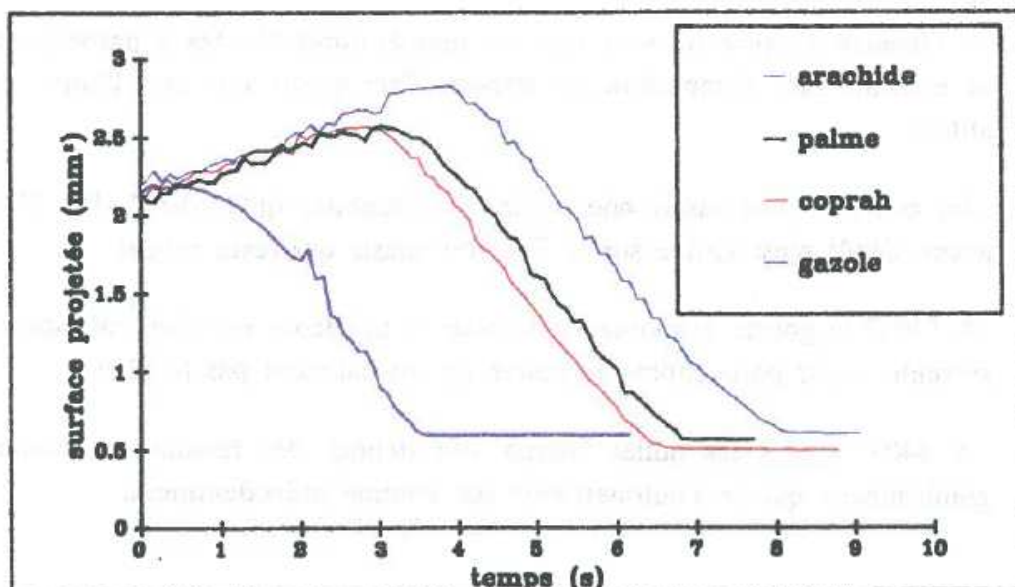


Figure 19 b : évolution de la surface projetée de gouttelettes d'huiles végétales en fonction du temps - température finale 630°C [20].

- Les huiles commencent à s'évaporer difficilement à des températures encore élevées comparativement au gazole. En dessous de 440°C (température finale), la plupart des huiles (en fait toutes sauf coprah) ne s'évaporent plus complètement, voir figure 20.

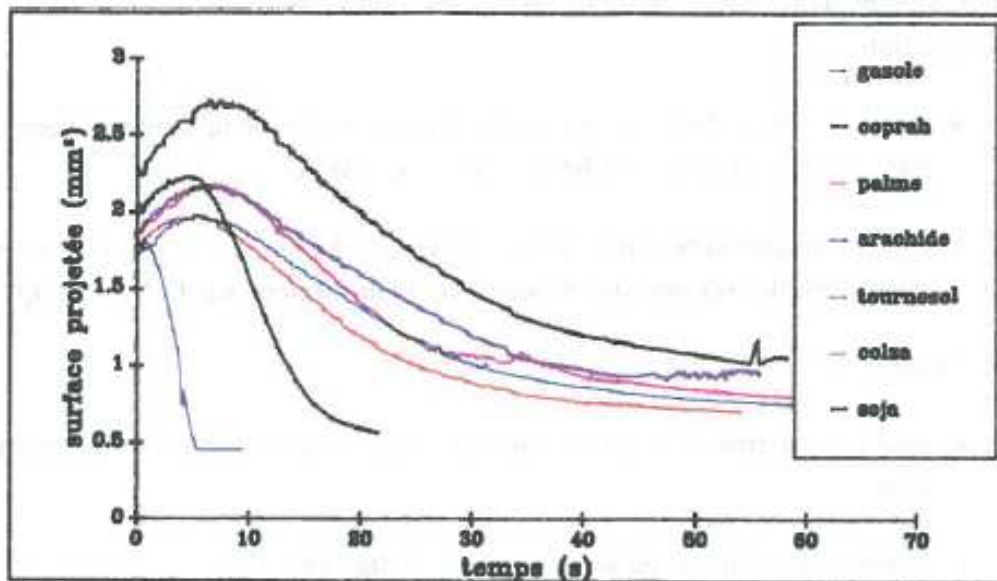


Figure 20 : évolution de la surface projetée de gouttelettes d'huiles végétales en fonction du temps pour - température finale 440°C [20].

- Dans les conditions d'essais décrites, plus la température se rapproche du seuil où l'évaporation des huiles végétales devient difficile, plus celles-ci laissent de dépôts sur la fibre de quartz.
- A l'inverse, il existe un seuil vers les températures élevées à partir duquel on ne constate plus de dépôts sur la fibre de quartz. Ceci, quelle que soit l'huile végétale utilisée. Au cours de nos essais, nous avons pu constater qu'à 630°C aucun dépôt n'est visible sur la fibre de quartz qui reste propre. A 540°C la goutte évaporée laisse place à un dépôt qui disparaît après 2 à 3 secondes (sauf pour coprah et palme qui ne salissent pas la fibre).
A 440°C toutes les huiles laissent des dépôts, des résidus charbonneux ou goudronneux qui ne s'auto nettoient pas, comme précédemment.

Conclusions :

Cette étude de l'évaporation met en œuvre un environnement expérimental déjà important. Elle nous a permis de constater :

- que les huiles végétales avaient un comportement général similaire au gazole.
- qu'à température donnée, chaque huile avait une évolution propre et un temps d'évaporation différent des autres huiles.
- qu'il était possible de classer les huiles végétales en termes de "rapidité d'évaporation" selon un classement qui rejoint celui des délais d'inflammation.

Par ailleurs, nous avons observé l'influence importante de la température sur les résultats :

- des évaporations incomplètes apparaissent à des températures beaucoup plus élevées pour les huiles que pour le gazole.
- à ces températures (< 500°C) les huiles végétales brutes ou raffinées laissent apparaître des résidus charbonneux ou goudronneux sur la fibre de quartz.

A l'inverse:

- plus la température est élevée plus les huiles tendent vers un comportement unique.
- **il existe un seuil à partir duquel les huiles végétales ne laissent pas de dépôts sur une fibre de quartz placée dans une veine d'air chaud.**

Ces résultats ont fait l'objet de communications en conférence internationale¹⁴.

3.1.5 Etude de l'évaporation de gouttelettes de mélanges d'huiles végétales et de fiouls et gazoles.

Depuis 2003, il y a un regain d'intérêt pour l'utilisation des huiles végétales pures et de leurs dérivés (esters méthyliques appelés : biodiesel) comme carburant pour moteurs diesels ou pour brûleurs. Cet intérêt est lié à leur potentiel à contribuer à une sécurité énergétique dans un contexte mondial caractérisé par la diminution des réserves mondiales de pétrole et l'augmentation des prix des combustibles fossiles. Leur caractère renouvelable et leur contribution potentielle à la réduction des émissions de gaz à effet de serre leur donnent un avantage sur les combustibles fossiles.

En particulier, l'utilisation d'huiles végétales peut être intéressante pour les pays en développement, en favorisant l'accès à des services énergétiques au niveau local dans différents secteurs : l'agriculture, l'irrigation, la production d'électricité, l'approvisionnement en eau potable, les transformations post-récolte (décorticage, mouture), ceci, en plus de leurs usages multiples existants (alimentaire pour certaines huiles végétales, fabrication de polymères, encres ...).

Leur principal inconvénient réside dans la question de la disponibilité des terres pour produire des quantités suffisantes, afin de satisfaire des besoins énergétiques à grande échelle (il y a alors concurrence avec l'alimentation).

Le co-encadrement des travaux de thèse de Tizane Daho¹⁵ a été l'occasion d'approfondir les connaissances sur les mécanismes d'évaporation des huiles, et de se pencher sur le comportement des mélanges huiles végétales et fiouls ou gazoles.

Nous avons comparé l'évaporation des gouttelettes de fioul domestique (DFO) et de trois huiles végétales actuellement utilisées ou étudiées en tant que biocarburant, afin de contribuer à une meilleure compréhension du mécanisme de vaporisation de leurs

¹⁴ P. Higelin, G. Vaitilingom, J. Andrzejewski, A. Sapinski, 1992. Evaporation and combustion aspects of vegetable oils use as fuel for I.C. engines. 2nd international Workshop on Fluid mechanics, Combustion, Emissions and Reliability in Reciprocating Engines; Capri. 6 p.

¹⁵ T. Daho, 2008. *Contribution à l'étude des conditions optimales de combustion des huiles végétales comme carburant dans les moteurs Diesel et sur les brûleurs : cas de l'huile de coton*. Thèse de doctorat, Université de Ouagadougou, Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement, Burkina Faso.

mélanges avec un combustible fossile. En effet, les mélanges font l'objet d'un grand intérêt en raison de la facilité supposée qu'ils auraient à résoudre le problème de la formation de résidus. Mais nous savions par ailleurs que la température moyenne des parois de chambre de combustion des moteurs diesels et des corps de chaudières est généralement au-dessous de la plage de températures où les huiles végétales se vaporisent sans former de résidus [27].

Nous avons utilisé le même dispositif d'évaporation que précédemment (voir 3.1.4). Ces travaux ont fait l'objet d'une publication¹⁶.

Trois huiles végétales actuellement utilisées ou étudiées en tant que biocarburant (colza, coton et jatropha) ont été sélectionnées et comparées à du fioul domestique pris comme référence. Les propriétés physiques et chimiques de ces quatre carburants sont présentées dans le tableau 11. Les compositions en acides gras des huiles végétales sont rapportées dans le tableau 12. Ces données sont le résultat d'analyses effectuées sur des lots raffinés industriellement pour le colza et l'huile de coton, tandis que l'huile de jatropha est issue d'une presse à huile artisanale après pressage à froid.

Properties	Methods	Cottonseed oil	Rapeseed oil	Jatropha oil	DFO
C (%)	Combustion	77.39	77.73	77.21	86.89
H (%)	Combustion	11.90	11.92	11.67	12.98
O (%)	Pyrolysis	11.10	10.76	11.12	0.45
N (%)	Combustion	<0.30	<0.10	ND	<0.30
S (%)	NFT 60 106	0	0	ND	0.20
Density (kg m⁻³ at 15 °C)	NF EN ISO 12185	922	920	919	844
Kinematic viscosity (mm² s⁻¹ at 37.8°C)	NF EN ISO 3104	35.7	35.7	36.8	3.3
Cloud point (°C)	NF T60 105	0	-11	-3	<-6
Pour point(°C)	NF T60 105	-3	-1	-3	-9
Flash point (°C)	NF EN ISO 2719	230	250	240	63
Surface tension (mN m⁻¹)	NF EN 14 370	32.4	32.2	ND	28.6
Low heating value (kJ kg⁻¹)	ASTM D 240	36000	36800	39100	43700
Carbon residue (%)	NF EN ISO 10370	0.41	0.41	1.31	0.08
Acid value (mgKOH g⁻¹)	ASTM D664	0.17	0.35	1.72	ND

Tableau 11 : propriétés physiques et chimiques des huiles végétales utilisées et du Fioul domestique.

¹⁶ Daho T, Vaitilingom G, Sanogo O, Ouiminga SK, Segda BG, Valette J, Higelin P, Koulidiati J. Study of droplet vaporization of various vegetable oils and blends of domestic fuel oil–cottonseed oil under different ambient temperature conditions. J Biomass and Bioenergy 2012;46:653–63.

L'indice d'acide de l'huile de jatropha est légèrement supérieur à celui des huiles de colza et de coton. Ici, l'indice d'acide est de 1,72 mg de KOH/g correspondant à 0,8-0,9% d'acide linoléique libre dans l'huile. Les acides gras libres s'évaporent à plus basse température que les huiles dont ils sont issus, par conséquent, la présence d'acides gras libres doit avoir une influence sur la vaporisation. Mais ici, ce taux est faible (l'huile de jatropha provenant de petites huileries présente généralement de 5% à 20% d'acides gras libres), donc cette huile de jatropha a été considérée comme équivalente à une huile «raffinée».

Fatty acid (wt. %)			Cottonseed oil	Rapeseed oil	Jatropha oil
Myristic	C14:0	$C_{14}H_{28}O_2$	0.80	0.0	0.0
Palmitic	C16:0	$C_{16}H_{32}O_2$	26.00	4.6	15.7
Palmitoleic	C16:1	$C_{16}H_{30}O_2$	0.60	0.0	0.0
Stearic	C18:0	$C_{18}H_{36}O_2$	2.40	1,7	6.4
Arachidic	C20:0	$C_{20}H_{40}O_2$	0.30	0.5	0.2
Oleic	C18:1	$C_{18}H_{34}O_2$	18.20	59.1	39.6
Linoleic	C18:2	$C_{18}H_{32}O_2$	51.50	25.8	36.9
Linolenic	C18:3	$C_{18}H_{30}O_2$	0.20	6.9	0.2

Tableau 12 : compositions en acides gras des huiles végétales utilisées.

Résultats sur les 3 huiles pures comparées au fioul domestique :

Sur l'huile de coton à 500°C (CSO : Cottonseed Oil), on retrouve les 3 phases de vaporisation décrites précédemment par la figure 18.

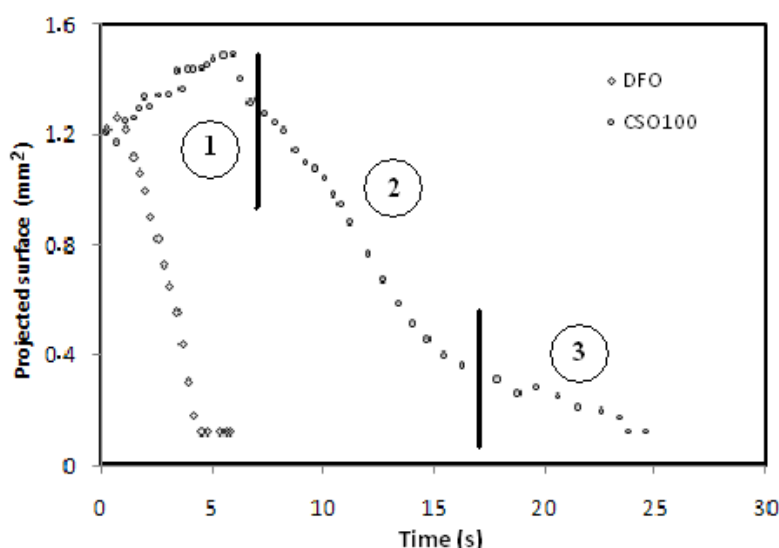


Figure 21 : évolution de la surface projetée de gouttelettes d'huile de coton et de fioul en fonction du temps pour - température finale 773 K.

La figure 22 présente l'évolution de la vaporisation pour chacun des 4 produits aux différentes températures étudiées.

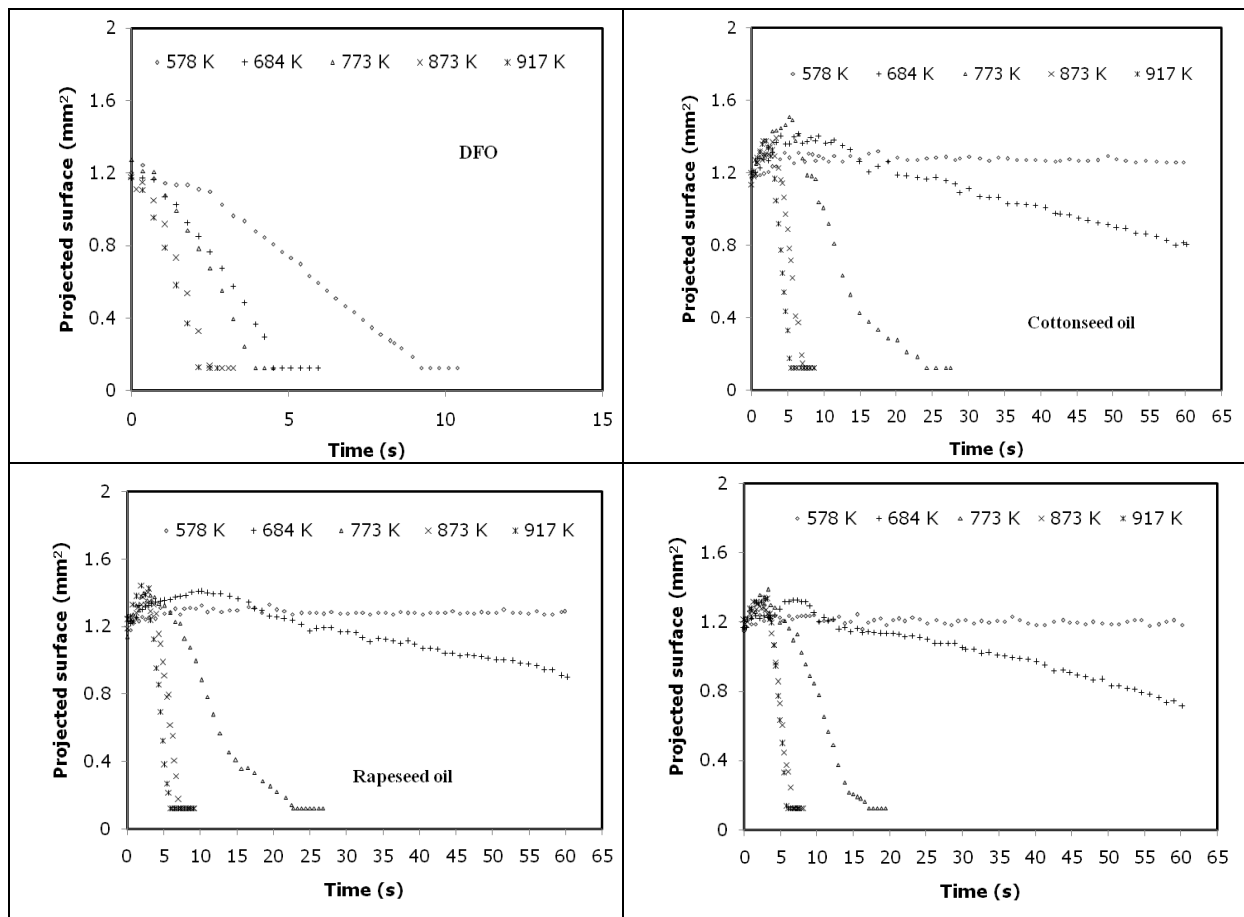


Figure 22 : évolution des surfaces projetées en fonction du temps de gouttelettes de fioul domestique (DFO), d'huiles de coton (cottonseed oil), de colza (rapeseed oil) et de jatropha curcas pour les 5 températures étudiées.

- Pour les 3 huiles végétales on note une absence de diminution de la surface projetée à 305°C (578 K) : il n'y a pas de vaporisation. À 411°C (684 K), la vaporisation est partielle, le diamètre de la gouttelette n'évolue plus après 60 secondes.
- **La première phase** correspond à la phase transitoire du processus d'évaporation des gouttelettes. Au cours de cette phase, la gouttelette subit un chauffage suivi d'une expansion ou non, selon le type de carburant.
- Pour les huiles comme pour le fioul, la durée de la phase transitoire diminue lorsque la température augmente.
- **La seconde phase** correspond à la phase établie de l'évaporation. L'évolution de la surface, ou le carré du diamètre, répond à la loi de régression linéaire pour tous les carburants à des températures supérieures ou égales à 600°C (873 K). La constante K de l'évaporation a été déterminée à ce stade.
- Pour **la troisième phase**, plusieurs cas sont observés : Dans le cas du fioul, cette période correspond à la fin de l'évaporation. Pour toutes les températures étudiées (Fig. 22), on observe un plateau, où la surface obtenue correspond à celle d'un cercle ayant un diamètre équivalent au diamètre de la fibre de quartz. Le même constat peut être fait avec des huiles végétales à des températures supérieures ou égales à 500°C (773 K).
- Indépendamment de l'huile, au cours de la seconde phase, l'évolution de la surface projetée des gouttelettes en fonction du temps n'est pas linéaire à 684 K, et n'est pas stable à 773 K. Cependant, à 873 K et 917 K, la pente semble être linéaire, permettant

la détermination de la constante K de l'évaporation par le procédé de la régression des moindres carrés. Il est possible de déterminer avec précision la phase quasi stationnaire à partir de laquelle la constante K de l'évaporation peut être déduit, par le calcul des taux de vaporisation instantanée en fonction du temps donné par l'équation $K_{inst}(t) = -d(d^2(t))/dt$.

La discussion est intéressante car pour le fioul, comme le montre la figure 23, la phase de chauffage transitoire observable à 578 K et 684 K est confirmée par la variation importante du taux de vaporisation instantanée. Pour 773 K, 873 K et 917 K, les variations sont plus faibles confirmant la stabilité quasi-linéaire de la vaporisation.

Avec des huiles végétales pures, il est nécessaire d'atteindre des températures suffisamment élevées (au moins 873 K) pour approcher une vaporisation quasi-stationnaire après la phase transitoire. La figure 24 illustre cela. À 917 K le taux d'évaporation instantanée est proche de 1 pour toutes les huiles végétales, ce qui reflète la nature constante des phénomènes à cette température. A 873 K, on peut observer la nature instable de l'évaporation des huiles végétales (dispersion relativement élevé du taux d'évaporation normalisé).

En conclusion, le fioul n'est pas un corps pur (ce qui est connu) et montre une similitude de comportement en vaporisation avec des huiles végétales. Ce qui le diffère de ces dernières sont des temps totaux plus courts de vaporisation complète à température égale (donc des coefficients d'évaporation plus élevés) et l'absence de formation de résidus finaux.

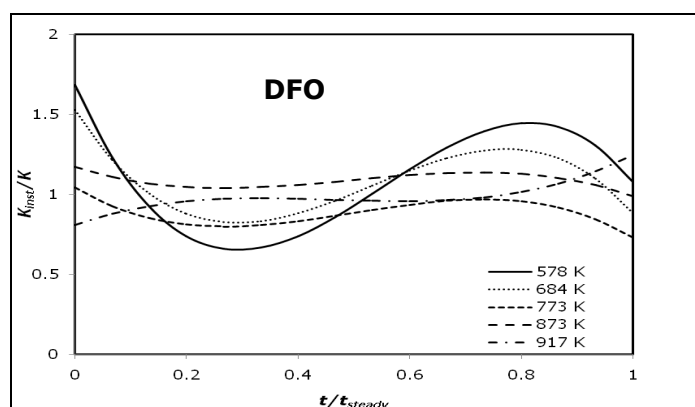


Figure 23 : taux d'évaporation instantané normalisé pour le fioul domestique aux différentes températures étudiées.

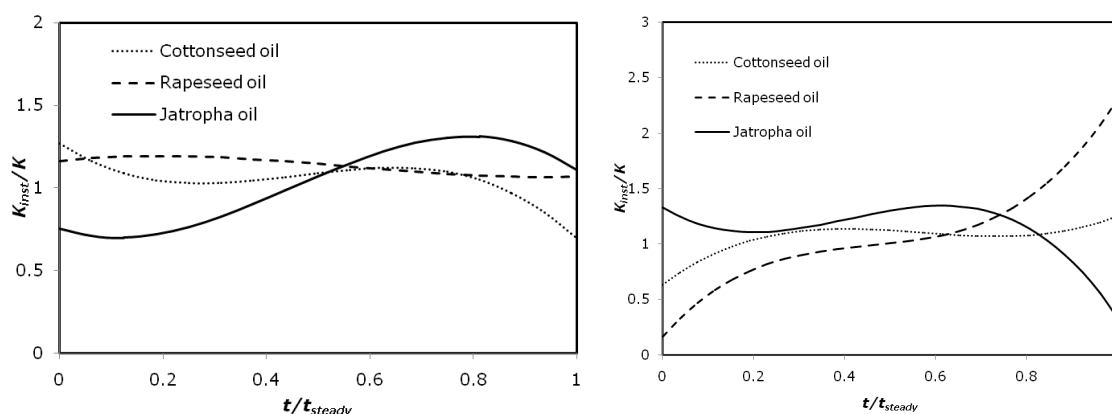


Figure 24 : taux d'évaporation instantané normalisé pour les huiles végétales à 917 K à gauche et 873 K à droite.

La figure 25 indique les valeurs des coefficients d'évaporation obtenus. Les valeurs expérimentales obtenues pour les différentes huiles végétales sont très similaires quelle que soit la température.

Les coefficients des huiles, à environ 850 K, rattrapent celui du fioul à 684 K. C'est bien le temps de phase 1 qui « pénalise » les huiles comme on peut le déduire du tableau 13 des temps de vaporisation (33 % du temps total pour le fioul à 917 K et 63 % pour l'huile de coton). On est amené à penser que la dégradation de la macromolécule d'huile végétale demande plus de temps et d'énergie que celle des molécules de fioul.

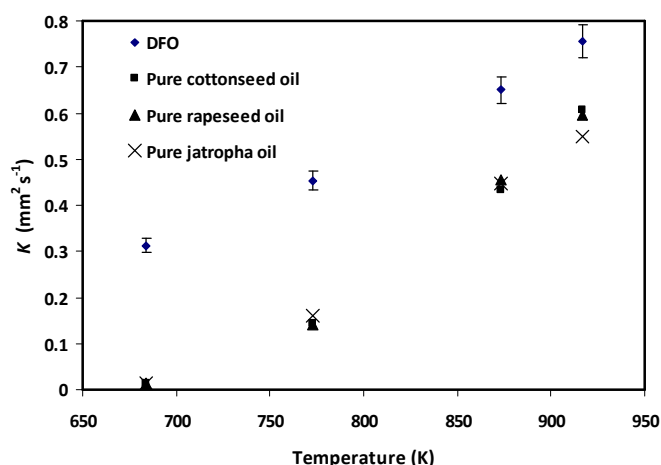


Figure 25 : Constantes d'évaporation des huiles végétales et du fioul en fonction de la température. (Les incertitudes sont tracées pour le DFO et non pour les huiles végétales pour une meilleure lisibilité).

Fuel	heating time (s) phase 1			Total time of evaporation (s)		
	773 K	873 K	917 K	773 K	873 K	917 K
DFO	1.4	1.1	0.7	3.9	2.3	2.1
Cottonseed oil	8.2	4.2	3.1	24.1	6.6	4.9
Rapeseed oil	8.2	4.1	3.3	22.8	7.2	5.8
Jatropha oil	6.6	3.8	3.6	17.0	6.5	5.8

Tableau 13 : temps de chauffage phase 1 et la durée totale de l'évaporation des gouttelettes de fioul (DFO), huile de coton, huile de colza et huile de Jatropha à 773 K, 873 K et 917 K.

Résultats sur les mélanges d'huile de coton et de fioul :

Parmi les 3 huiles végétales, l'huile de coton a été choisie pour réaliser des mélanges avec le fioul domestique CS020, CS040, CS060, CS080 et CS0100, contenant respectivement 20, 40, 60, 80 et 100 % d'huile de coton.

La figure 26 montre l'évolution de la surface de gouttelettes de mélanges pour différentes températures, chaque courbe montre des parties bien distinctes, ce qui est particulièrement évident pour les mélanges avec des teneurs élevées en fioul (CS020 et CS040). En particulier pour CS080, l'évaporation du fioul se produit pendant la phase d'expansion de l'huile de coton

Pour les trois températures (917 K, 873 K et 773 K) où l'évaporation complète d'huiles végétales pures peut être observée, les courbes montrent une succession de deux zones quasi-linéaires de pentes différentes reliées par une zone de transition.

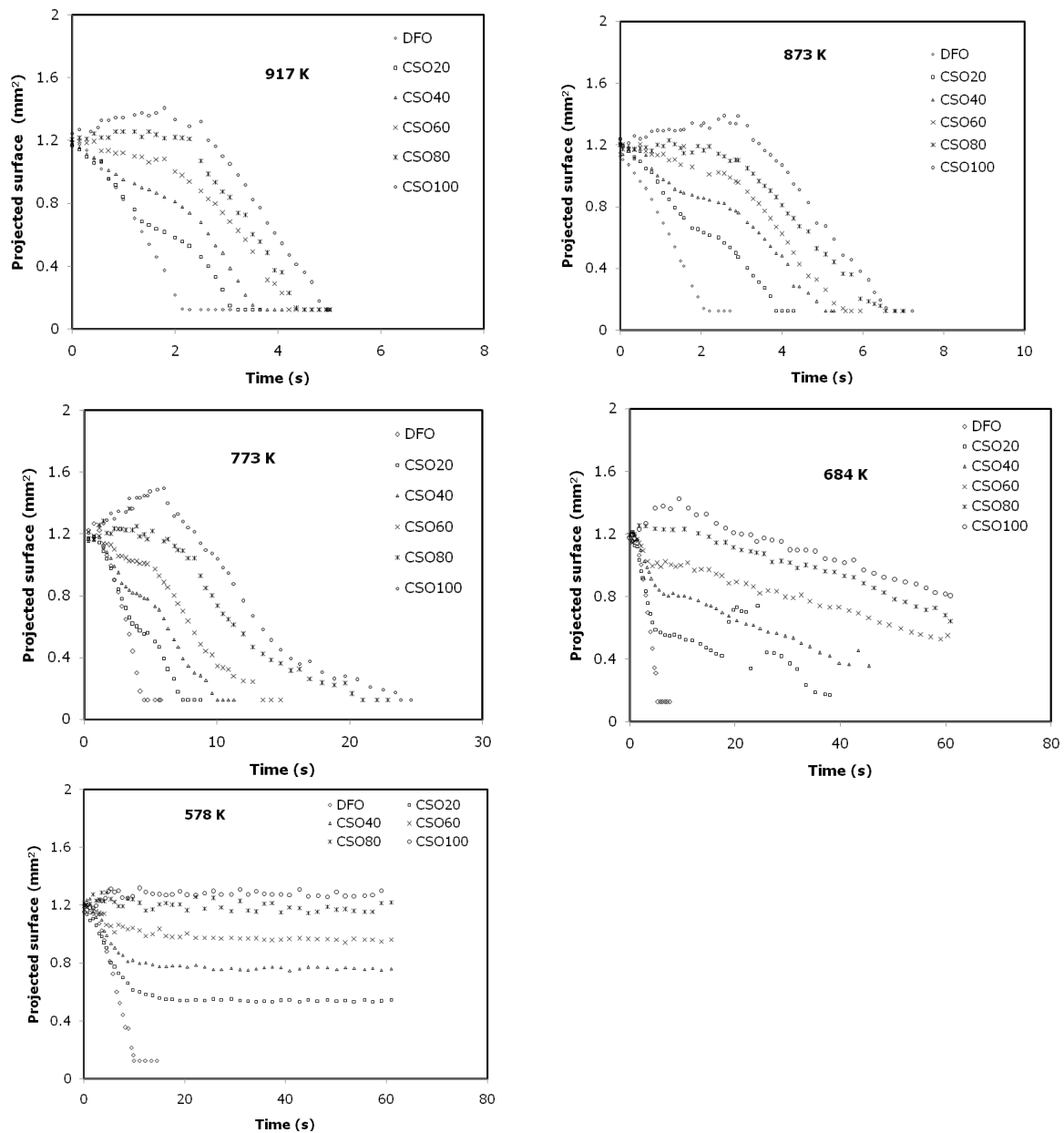


Figure 26: Influence du pourcentage d'huile de coton incorporée dans le fioul (DFO) à différentes températures.

On peut avancer l'hypothèse que le fioul se vaporise dans un premier temps, suivi d'une transition correspondant à la phase transitoire de l'évaporation de l'huile de coton. Ce résultat indique qu'il existe une intense recirculation interne dans la gouttelette (modèle à diffusivité infinie) de telle sorte que la température et la composition du mélange soient homogénéisées en permanence. La température de la gouttelette est proche de la température d'équilibre pour vaporiser le fioul, en premier lieu, sauf pendant la phase de transition où la goutte subit un chauffage et va atteindre un nouvel équilibre pour la vaporisation de l'huile de coton. Le mécanisme de diffusion pure devient prépondérant lorsque la concentration de l'huile végétale dans la gouttelette augmente avec la progression de l'évaporation.

La comparaison des pentes des deux parties linéaires avec les constantes d'évaporation précédemment calculées a été effectuée afin de vérifier l'hypothèse que le fioul s'évapore en premier, et que seule l'huile de coton est présente dans la gouttelette après la phase transitoire. Les calculs de K (tableau 14) pour tous les mélanges ont été réalisés pour 873 K et 917 K, température où l'évaporation du fioul et de l'huile de coton est presque constante (voir fig. 22).

Pour les mélanges, l'estimation de K est limitée à la seconde partie linéaire (appelé ici partie II) où l'on suppose que le fioul s'est évaporé complètement. La figure 27 indique que le critère de détermination du début de la phase II a été choisi comme l'instant où le volume instantané est égal au volume initial d'huile de coton du mélange.

Fuel type	873 K		917 K	
	K ($\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$)	Relative deviation (%)	K ($\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$)	Relative deviation (%)
DFO	0.650	0.00	0.756	0.00
CSO20 (part I)	0.507	-22.00	0.651	-13.89
CSO20 (part II)	0.423	-0.43	0.599	-1.32
CSO40 (part II)	0.410	-5.31	0.623	2.63
CSO60 (part II)	0.435	0.46	0.583	-3.90
CSO80 (part II)	0.395	-8.78	0.613	0.98
CSO100	0.433	0.00	0.607	0.00

Partie I: Première partie linéaire, l'écart relatif de K est estimé à partir de la valeur de K pour le fioul

Partie II: Deuxième partie linéaire, l'écart relatif de K est estimé à partir de la valeur de K pour CSO100.

Tableau 14 : constantes d'évaporation pour les deux parties d'évaporation du fioul, l'huile de coton et de leurs mélanges.

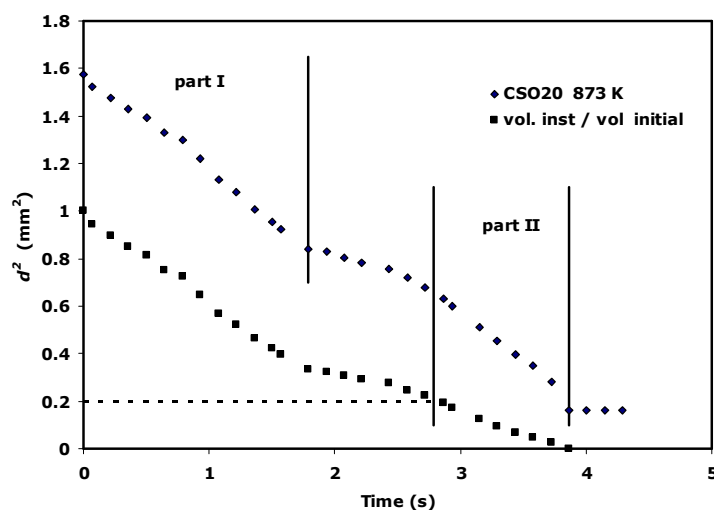


Figure 27 : Evolution de d^2 en fonction du temps pour une gouttelette de CSO20 à 873 K. Illustration de la détermination du début de la «partie II» supposée être du pur CSO (huile de coton). La ligne pointillée représente 20% du volume de la goutte initiale de CSO20.

Le calcul de K pour CSO20 sur la première partie linéaire (part I) donne une différence relative de 22% et 13,89% par rapport à celle du fioul, respectivement à 873 K et 917 K. Cette différence est importante compte tenu des incertitudes de 9% sur la détermination de K . Cela signifie que, même pour des proportions initiales importantes de fioul, la chaleur reçue par la goutte n'est pas utilisée exclusivement pour l'évaporation de celui-

ci, mais aussi pour le réchauffage de l'huile de coton, ce qui ralentit la vitesse d'évaporation du fioul.

Toutefois, pour CSO20 sur la deuxième partie (part II), les valeurs des constantes d'évaporation obtenues montrent une différence relative de -0,43% et -1,32% par rapport à celui de CSO100, à respectivement 873 K et 917 K. Ce résultat indique que c'est de l'huile de coton qui s'évapore principalement. Pour tous les mélanges, les valeurs de K obtenues sont comparables à celles de l'huile pur de coton.

En conclusion :

- dès lors que l'on se situe dans des températures où l'on observe une vaporisation complète des huiles végétales ($> 500^{\circ}\text{C}$), on remarque une similitude de comportement avec les fiouls et gazoles.
- La loi dite en d^2 s'applique bien aux huiles quand la température est au dessus de 600°C mais seulement sur la partie d'évaporation établie.
- les écarts entre coefficients d'évaporation se resserrent plus la température augmente. Il faut un peu moins de 200 degrés supplémentaires pour que les coefficients des huiles rattrapent ceux du fioul.
- En revanche, c'est la partie « transitoire » précédant l'évaporation établie qui marque la différence entre huiles végétales et fioul. Elle est significativement plus longue pour les huiles, impactant ainsi, leur temps total de vaporisation.

En ce qui concerne les mélanges :

- • les mélanges s'évaporent suivant un mécanisme de distillation séquentielle ; le fioul s'évapore en premier, suivi par l'huile végétale.
- • Ainsi, sauf pour des quantités modérées d'huile ($\leq 20\%$), les mélanges ne semblent pas aider à résoudre le problème de la formation de résidus à des températures de moins de 773 K.

Tentatives de modélisation de l'évaporation de gouttelettes d'huile de coton :

L'objectif est de proposer une approche afin de prédire les caractéristiques d'évaporation des huiles végétales. Pour cela, un modèle théorique existant a été utilisé et comparé avec les résultats expérimentaux.

L'une des difficultés dans la détermination des constantes théoriques d'évaporation réside dans la connaissance des propriétés thermodynamiques et de transport. L'approche utilisée ici pour déterminer le transport et les propriétés thermodynamiques des phases liquide et gazeuse de l'huile de coton est basé sur les propriétés de ses acides gras prédominants (linoléique, oléique et palmitique). Ceci pour deux raisons principales : les travaux antérieurs sur les délais d'inflammation et l'évaporation indiquent de bonnes corrélations avec la nature des acides gras, ensuite, il est assez difficile de trouver des données sur les propriétés thermodynamiques des huiles végétales mêmes.

Les résultats expérimentaux de l'évaporation de gouttes de combustibles liquides, effectuée dans des conditions définies par la théorie quasi-stationnaire, montrent en général que « la loi en d^2 » est vérifiée. Toutefois, on peut noter que :

- la période de préchauffage (phase transitoire) de la goutte sur le temps total d'évaporation (négligée dans la théorie quasi-stationnaire) n'est pas négligeable, surtout dans le cas des combustibles peu volatiles.

- Les effets convectifs, négligés dans la théorie quasi-stationnaire, sont importants dans les moteurs ou sur les brûleurs, et même dans la plupart des études expérimentales entreprises sur l'évaporation des gouttes de combustibles.

Nous avons donc comparé les valeurs expérimentales des coefficients d'évaporation $K_{(exp)}$ avec celles obtenus grâce au modèle quasi-stationnaire K et celles calculés en tenant compte de la convection K_c , et enfin ceux tenant compte de la convection et du temps de préchauffage K_{cc} .

On retrouvera la description de ces travaux dans la publication jointe en annexe¹⁷.

K a été calculé en prenant en compte les hypothèses du modèle quasi-stationnaire :

$$d^2(t) = d_0^2 - K(t - t_0)$$

Avec :

$$K = 8 \cdot \frac{\rho_{fg}}{\rho_{fl}} \cdot D \cdot \ln(1 + B_M)$$

Où,

$$K = 8 \cdot \frac{\lambda_g}{C_{pg} \cdot \rho_g} \ln(1 + B_T)$$

et

$$B_M = \frac{Y_{fs} - Y_{f\infty}}{1 - Y_{fs}}$$

$$B_T = \frac{C_{pg}(T_\infty - T_s)}{L_v}$$

K_c a été déterminé en utilisant la corrélation de Ranz et Marshall pour tenir compte de la convection :

$$K_c = K(1 + 0.5 \text{Pr}^{1/3} Gr^{1/4})$$

Où :

$$Gr = \frac{g \beta \rho_g^2 d_0^3 \Delta T}{\mu_g^2}$$

Et

¹⁷ Daho T, Vaitilingom G, Sanogo O, Ouiminga SK, Segda BG, Valette J, Higelin P, Koulidiati J. model for predicting evaporation characteristics of vegetable oils droplets based on their fatty acid composition. Int J Heat and Mass Transfer 2012;55: 2864-71.

$$Pr = \frac{\mu_g C_{pg}}{\lambda_g}$$

Kcc : l'influence de la convection et du temps de préchauffage sont pris en compte grâce à l'équation suivante :

$$K_{cc} = K \left(1 + 0.5 Pr^{1/3} Gr_{d_{cc}}^{1/4} \right)$$

Dans le calcul du nombre de Grashof, le diamètre corrigé d_{cc} n'est pas le diamètre initial. Il est fonction du temps de chauffage de la goutte, de son diamètre initial et du taux d'évaporation pendant la phase de chauffage.

$$d_{cc} = 0.5^{4/3} \left(d_0^2 - K_h t_1 \right)^{1/2}$$

Ici, la constante d'évaporation au cours de la phase de chauffage K_h est égale à zéro et t_1 est le temps de chauffage. Donc un diamètre moyen de la phase stationnaire d_{cc} est donnée par :

$$d_{cc} = 0.5^{4/3} d_0$$

Les acides gras qui composent l'huile de coton interviennent dans les calculs des propriétés thermodynamiques et des propriétés de transport :

- La chaleur latente de vaporisation
- la chaleur massique du mélange gazeux
- la conductivité thermique du mélange gazeux
- le coefficient de diffusion binaire
- la masse volumique du combustible gazeux et liquide
- les nombres de transfert thermique et massique.

➤ Les résultats sur le fioul sont présentés dans la figure 28.

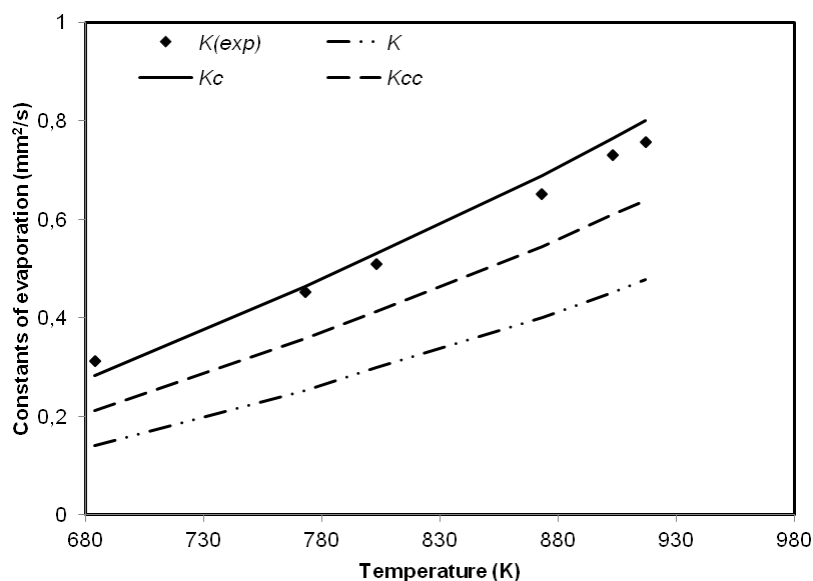


Figure 28 : Coefficients d'évaporation expérimentaux et théoriques comparés pour le fioul.

Pour le fioul, les valeurs expérimentales des coefficients d'évaporation sont plus élevées que les valeurs théoriques obtenues par le modèle quasi-stationnaire (K) ou celles obtenues en considérant les effets cumulés de la convection et de la phase transitoire (K_{cc}). Cependant, les valeurs théoriques obtenues en prenant uniquement en compte la convection (K_c) montrent un bon accord avec les valeurs expérimentales. Ce résultat montre que l'influence des phénomènes de convection est importante et que la période de chauffage a peu d'influence sur les coefficients d'évaporation du fioul dans la plage de températures étudiée. Compte tenu de ce résultat, il ne semble pas nécessaire de prendre en compte l'influence de la phase transitoire dans la prédiction des coefficients d'évaporation des carburants diesels.

Les coefficients d'évaporation des gouttelettes de fioul sont bien prédits avec la corrélation de Ranz et Marshall en tenant compte uniquement de la convection.

➤ La figure 29 présente les résultats sur l'huile de coton.

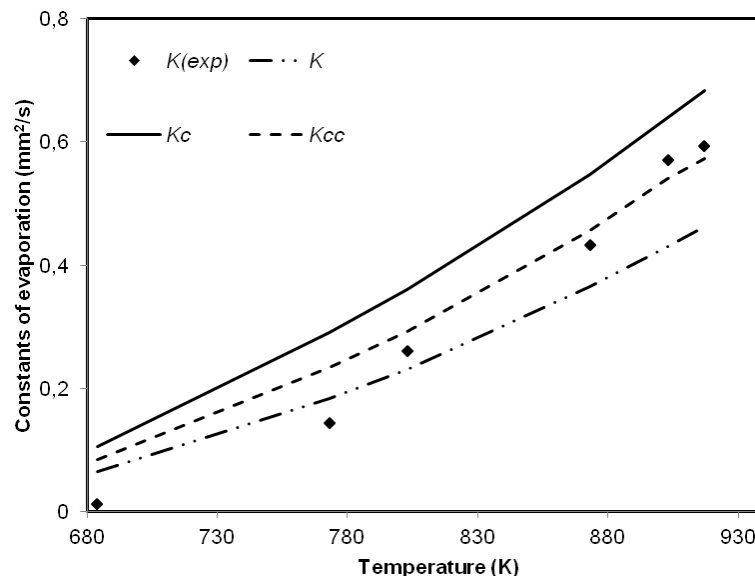


Figure 29 : Coefficients d'évaporation expérimentaux et théoriques comparés pour l'huile de coton.

Avec l'huile de coton, pour les températures inférieures à la température de vaporisation totale (684 K à 773 K), les valeurs expérimentales des coefficients d'évaporation sont plus faibles que les valeurs théoriques (compte tenu ou non de l'effet de la convection et de la phase transitoire). Lorsque la température augmente vers 773 K, les valeurs expérimentales sont toutefois proches des valeurs théoriques du modèle quasi-stationnaire (K). Ce résultat est dû au fait que le modèle quasi-stationnaire, en plus de ses hypothèses simplificatrices, ne prend pas en compte le phénomène de la dilatation de la goutte, dont la durée est plus longue à basse température. Par ailleurs, les phénomènes convectifs sont moins influents à basse température.

Pour des températures supérieures à 773 K, les valeurs expérimentales et théoriques des coefficients d'évaporation sont proches si l'on tient compte de la convection et de l'influence de la phase de chauffage. En effet, avec l'augmentation de la température

ambiante, la convection devient plus importante, mais l'influence de la phase transitoire reste plus élevée que dans le cas du fioul.

Ainsi, pour des températures inférieures à 773 K, il n'est pas nécessaire de prendre en compte l'influence de la convection pour la prédiction des coefficients d'évaporation de l'huile de coton. Cependant, pour des températures supérieures à 773 K, il est essentiel de tenir compte de la convection et de l'influence de la phase transitoire. En résumé, **pour l'huile de coton et pour des températures inférieures à 773 K, le modèle quasi-stationnaire donne des résultats acceptables, alors que pour des températures supérieures à 773 K, la corrélation de Ranz et Marshall, tenant compte de l'influence de la convection et de la phase transitoire donne une bonne prédiction des valeurs des coefficients d'évaporation.**

L'ensemble de ces travaux souligne l'influence des phénomènes intervenant pendant la « phase transitoire » précédant l'évaporation établie des huiles végétales et amène à approfondir les connaissances sur celle-ci. Ce constat a influencé l'orientation des travaux menés actuellement qui sont décrits dans le chapitre 4.

Evolution du dispositif d'évapoalagmométrie :

Le défaut principal du dispositif expérimental précédent est de réaliser l'évaporation de la goutte dans un écoulement composé d'un mélange de gaz brûlés et d'air. Les résultats restent valables en comparant différents carburants dans des conditions expérimentales identiques. Par contre, la confrontation des données expérimentales par rapport aux modèles d'évaporation de gouttes dans de l'air pur n'est satisfaisante que dans le cas de températures d'écoulement faibles, entraînant un taux important de dilution des gaz évaporés. Par ailleurs, la faible vitesse de l'écoulement permet de considérer un régime de convection non forcée mais, en revanche, les produits vaporisés sont entraînés, ce qui influe sur la nature du milieu entourant la gouttelette.

C'est pourquoi nous avons choisi de réaliser une enceinte chauffée et régulée électriquement, illustrée par la figure 30.

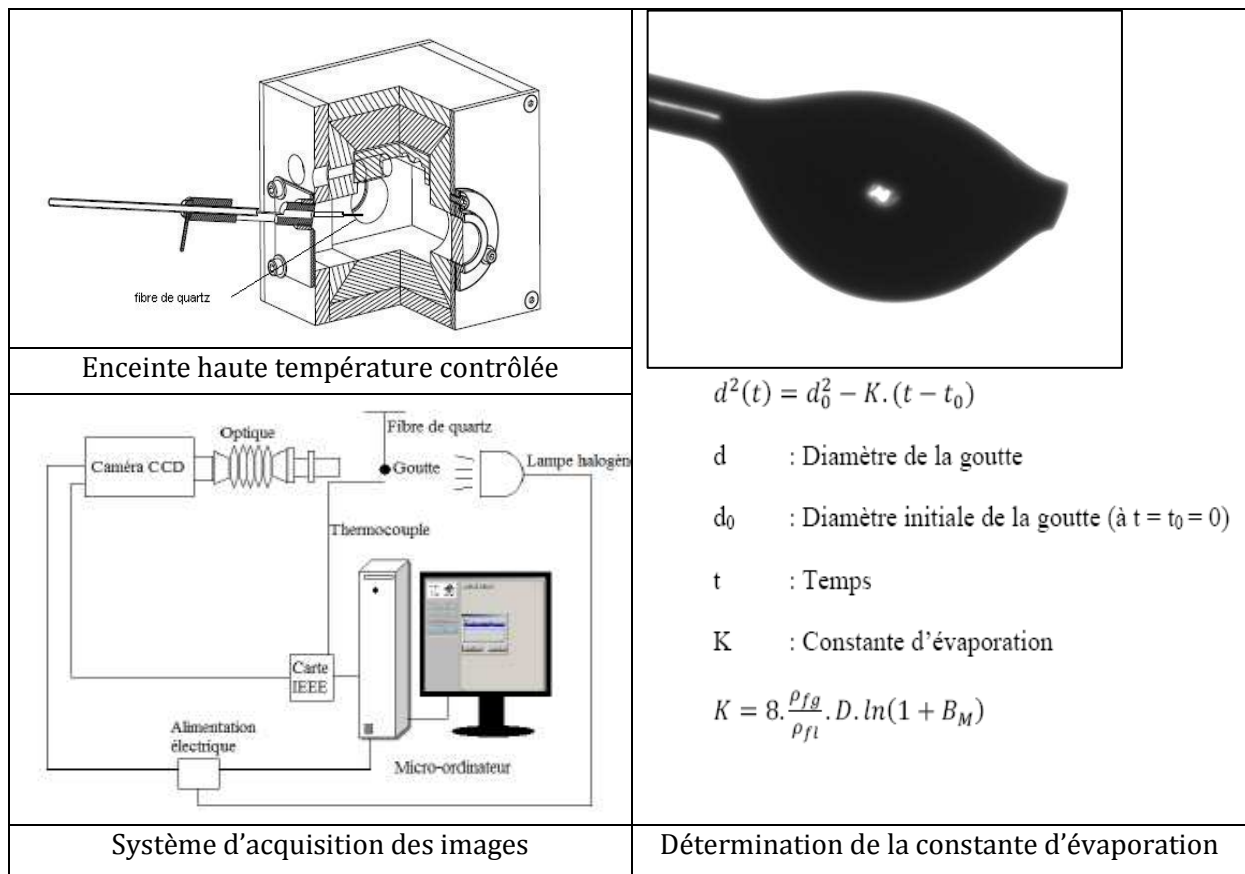


Figure 30 : Evolution du dispositif expérimental de la caractérisation de l'évaporation des gouttes.

La gouttelette, dont le volume est contrôlé grâce à une micro pipette, est placée sur le bout d'une fine tige de quartz. Une enceinte thermiquement isolée est chauffée à une température de consigne régulée. L'enceinte est équipée d'une entrée-sortie permettant de modifier la nature du milieu ambiant ou le balayage avec de l'air ou tout autre gaz (azote, CO₂,...).

Dès l'introduction de la tige dans l'enceinte, ont lieu l'acquisition de la température au voisinage de la goutte et des images de l'évaporation (25 à 50 images/seconde).

Un traitement des données permet de tracer l'évolution de la surface projetée de la goutte en fonction du temps et la détermination du coefficient d'évaporation du produit.

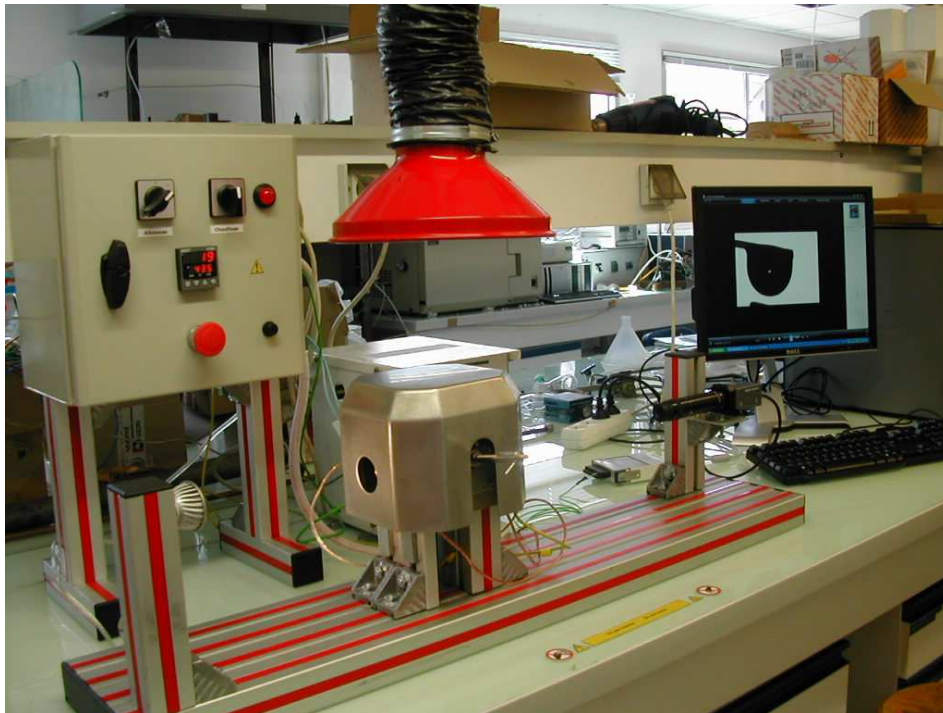


Photo4 : Le dispositif d'évapostralagmométrie « EVA » du Cirad Montpellier.


Grâce à ce dispositif, il est possible de mettre en évidence l'existence de corrélations entre les caractéristiques physico-chimiques, les phénomènes précédant la combustion (granulométrie et évaporation) et la combustion des huiles végétales.

Les connaissances acquises au cours des travaux exposés plus haut, ont permis d'aborder l'optimisation de la combustion des huiles végétales qui fait l'objet du chapitre suivant. Et le fait d'avoir établi le lien entre la composition en acides gras et les délais d'inflammation, et d'avoir écarté l'influence des composés minoritaires permet une certaine expertise quant à la contribution à l'établissement de normes pour les huiles végétales mais également sur la « prédisposition » d'une huile en tant que carburant.

Ce dernier aspect peut s'illustrer par le projet SHAMASH dans lequel j'ai été impliqué. Les travaux sur les normes font l'objet du paragraphe 3.1.7.

3.1.6 Application aux biocarburants lipidiques issus de microalgues.

SHAMASH (2006-2010) est un projet ANR financé dans le cadre du Programme National de Recherche sur les Bioénergies (PNRB).

TITRE DU PROJET : Production de biocarburants lipidiques par des microalgues	
ACRONYME : SHAMASH¹⁸	



Ce projet, qui a démarré en décembre 2006, avait pour objectif de produire un biocarburant à partir de microalgues autotrophes. Ces microorganismes peuvent accumuler jusqu'à 50% de leur poids sec en acides gras, permettant d'envisager des rendements à l'hectare supérieurs d'un facteur 30 aux espèces oléagineuses terrestres. Le projet Shamash intègre des spécialistes de la culture, de la physiologie et de l'utilisation de microalgues, des spécialistes de l'optimisation des procédés biotechnologiques ainsi que des spécialistes des biocarburants et de l'extraction et de la purification de lipides.

Mon travail dans la tâche 4 (**Extraction/Caractérisation/Transformation**) consistait à établir les liens entre caractéristiques des huiles de microalgues et leur qualité en tant que biocarburants. L'objectif étant de proposer des recommandations de compositions en acides gras des huiles de microalgues à destination biocarburant, et d'orienter les

¹⁸ Divinité représentant le soleil en Mésopotamie.
Page 74 sur 202

choix vers les souches pouvant produire les « bons » lipides pour un biocarburant. Puis, dans une seconde phase, une fois les lipides microalgales obtenus, de donner une évaluation qualitative des huiles et des Biodiesels produits.

L'objectif de Shamash était clairement la production de Biodiesel à partir de lipides issus de microalgues. L'usage en HVP, sans être écarté, n'était pas la priorité de cette recherche.

Après l'exposé de l'influence de la composition en acides gras et des composés minoritaires, j'ai pu rappeler les contraintes techniques liées à la composition en acides gras et orienter les travaux sur la sélection des souches les plus adaptées à produire des Biodiesels de qualité.

Contraintes techniques et composition en acides gras des huiles végétales terrestres ou marines :

En première approche, les contraintes techniques majeures à prendre en compte sont essentiellement : les propriétés d'écoulement à froid, la stabilité à l'oxydation et la viscosité.

- Les propriétés d'écoulement à froid : celles-ci sont tributaires des conditions climatiques régionales. Si l'on prend le point de fusion comme indicateur on s'aperçoit que la saturation peut pénaliser l'usage de biodiesels trop riches en acides gras au-delà du Myristique (C14:0 ; son méthyl ester présente un point de fusion de 18,5 °C). Les HVP sont immédiatement pénalisées dès qu'elles ne sont plus essentiellement caprylique C8:0, ce qui ne se rencontre guère (voir figure 31 et tableau). Pour les HVP saturées, on peut avancer que seuls des usages à poste fixe sont envisageables sous nos latitudes. En effet les huiles saturées courantes seront souvent à l'état solide ce qui les élimine de tout usage roulant, alors que les systèmes de réchauffage déjà existants pour les fiouls lourds leur ouvrent la porte des applications stationnaires.

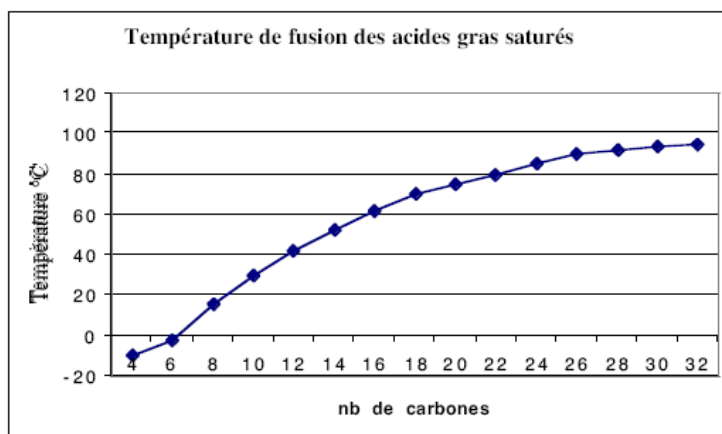


Figure 31 : température de fusion des acides gras saturés [22].

Masse moléculaire et point de fusion des principaux acides gras

	Acide gras saturé	Masse moléculaire (Kda)	Point de fusion (°C)
C4 : 0	butyrique	88.10	-7.9
C6 : 0	caproïque	116.16	-3.4
C8 : 0	caprylique	144.21	16.7
C10 : 0	caprique	172.26	31.6
C12 : 0	laurique	200.31	44.2
C14 : 0	myristique	228.36	54.4
C16 : 0	palmitique	256.42	62.9
C18 : 0	stéarique	284.47	69.6
C20 : 0	arachidique	312.52	75.4
C22 : 0	béhénique	340.57	80.0
C24 : 0	lignocérique	368.62	84.2
	insaturé		
C12 : 1	laurooléique	198.29	- (1)
C14 : 1	myristoléique	226.34	- (1)
C16 : 1	palmitoléique	254.39	- (1)
C18 : 1	oléique	282.44	- (1)
C20 : 1	gadoléique	310.50	- (1)
C22 : 1	érucique	338.55	- (1)
C24 : 1	sélacholéique	366.60	- (1)
C18 : 2	linoléique	280.43	- (1)
C18 : 3	α -linoléique	278.41	- (1)
C20 : 4	arachidonique	304.45	- (1)

(1) Le point de fusion des acides gras insaturés varie de -50 à 30 °C

Tableau 15 : Masse moléculaire et point de fusion des principaux acides gras [22].

- La stabilité à l'oxydation : une mauvaise stabilité reflète un potentiel de détérioration des qualités du carburant. On trouve dans les bibliographies [23] des taux relatifs de 1 pour les oléates (méthyl ou éthyl), 41 pour les linoléates et 98 pour les linoléates. Ceci est important car cela signifie que les biodiesels ou HVP contenant trop d'insaturés seraient sujets à des dégradations de leurs qualités carburant.
- La viscosité : celle-ci est importante vis-à-vis des équipements et périphériques des moteurs qui sont conçus pour les viscosités des gazoles et des fiouls (entre 2 et 5 mm²/s à 40 °C). Les spécifications en vigueur devraient évoluer pour tenir compte des particularités des biocarburants. Dans le cas des biodiesels il n'y a pas de problèmes, les plages de viscosité des exigences des normes carburant englobent celles des méthyl ou éthyl esters d'huiles végétales. Ceci même pour les esters d'acide linoléique (C18:3) tri-insaturés. Les viscosités des HVP, en revanche, sont en dehors des spécifications gazole. Ce qui signifie que les moteurs qui vont les utiliser doivent intégrer des systèmes de réchauffages adéquats.
- Il existe d'autres contraintes techniques liées aux compositions de huiles, tel que le pouvoir lubrifiant par exemple, mais elles demeurent mineures face aux trois précédentes.

Recommandations de compositions en acides gras des huiles de micro algues à destination biocarburant.

Une synthèse des points soulevés précédemment fait apparaître :

- une préférence pour les huiles contenant des acides gras saturés pour leur qualité carburant.
- que cette saturation entraîne des points de fusion trop élevés pour un usage carburant pour les transports.
- Que la présence d'acides gras insaturés augmente la viscosité des HVP et des biodiesels qui leur sont issus, mais en restant dans les plages de spécification en vigueur pour les gazoles et les fiouls.
- Mais qu'en revanche les acides gras di et tri insaturés ont une mauvaise influence sur la stabilité à l'oxydation des HVP et des biodiesels.

On peut prendre comme référence l'huile de colza et son méthyl ester car ceux-ci font l'objet d'usage en tant que biocarburant, depuis plus de 15 ans en Europe.

COLZA	%	Nom de l'acide
C6:0	-	Caproïque
C8:0	-	Caprilyque
C10:0	-	Caprique
C12:0	-	Laurique
C14:0	-	Myristique
C16:0	5	Palmitique
C18:0	1-2	Stéarique
C20:0	0.5	Arachidique
C22:0	0.2	Bénéhique
C24:0	-	Lignocérique
Total saturés	6.7 – 7.7	
C16:1,n-7	0.2	Palmitoléique
C18:1,n-9	58	Oléique
Total mono insaturés	58.2	
C18:2,n-6	22	Linoléique
C18:3,n-3	8-10	α -Linoléique
C18:3,n-6	-	γ -Linoléique
C18:3,n-3	-	Eléostéarique
C20:1,n-9	-	Gadoléique
C20:4,n-6	-	Arachidonique
C2:1,n-92	1	Erucique
C24:1,n-9	-	Nervotique
Total polyinsaturés	31 - 32	

Tableau 16 : Composition en acides gras d'une huile de colza [20].

Cette huile apparaît, selon les hypothèses émises, pas assez saturée et trop tri-insaturée pour être un modèle en tant que biocarburant.

On peut proposer la composition en acides gras d'une huile végétale idéale pour être utilisée comme carburant Diesel, soit sous forme de Biodiesel (ester) soit sous forme naturelle HVP.

Nous pouvons alors comparer cette « **huile idéale** » avec l'huile de colza qui, même si elle ne respecte pas tous les souhaits, est massivement utilisée en Europe (8 millions de tonnes en 2009) sans poser de problèmes techniques et qui sert, rappelons-le, de référence à l'établissement de la norme Biodiesel EN 14214.

% masse	C6:0 - C16:0	C18:0 - C24:0	C16 :1 - C24:1	C18:2	C18:3
Huile «idéale»	28	2	50	20	-
Colza	5	2	59	22	10

Tableau 17 : Composition en groupes d'acides gras d'une huile végétale « idéale » à vocation biocarburant.

Comparaison avec les compositions en acides gras des algues retenues dans la programme SHAMASH.

Les espèces choisies sont regroupées dans le tableau suivant¹⁹, on retrouve :

- des espèces marines : *Isochrysis galbana Tahiti* (Prymnesiophyceae), *Chlorella sp* et *Phaeodactylum sp* (diatomée sans silice)
- des espèces d'eau douce : *Chlorella vulgaris*, *Neochloris oleoabundans* (Chlorophyceae).

...

Sans entrer dans le détail des différents types d'acides gras, on peut cependant comparer les espèces présélectionnées avec l'huile « idéale » et l'huile de colza. Nous proposons de comparer les compositions par groupe d'acides gras saturés, monoinsaturés et polyinsaturés.

¹⁹ G. Vaitilingom, P. Lozano. Composition of fuels derived from the microalgae and their differences with those from the Biodiesel. 4th Seminar of European Customs Chemists, Helsinki, Finland, 2-4 June 2010.

vegetable oil		marine			Micro algae				
microalgae		freshwater							
%	fatty acid	Rapeseed	SunFlower	SoyBean	Chlorella sp.	Phaeodactylum tricornutum	Cylindrotheca closterium	Nannochloropsis sp	Chlorella vulgaris
Saturated total		7,3	11,2	13,9	24,9	19,1	31,0	26,8	43,6
C6:0	Caproic	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C8:0	Caprylic	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C10:0	Capric	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C12:0	Lauric	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C14:0	Myristic	0,0	0,1	0,0	2,0	7,4	7,4	3,9	2,8
C16:0	Palmitic	5,0	6,1	8,0	19,6	11,3	22,7	20,5	20,6
C18:0	Stéaric	1,8	4,2	5,0	3,3	0,4	0,6	1,8	11,7
C20:0	Arachidic	0,5	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	7,8
C22:0	Behenic	0,0	0,7	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C24:0	Lignoceric	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,6	0,6
Monounsaturated total		59,2	27,2	22,2	14,6	24,7	30,6	30,0	11,7
C16:1,n-7	Palmitoleic	0,2	0,0	0,0	8,8	22,4	25,8	25,9	0,1
C18:1,n-9	Oleic	58,0	26,9	22,2	5,7	2,3	4,8	4,1	4,8
C20:1,n-9	Gadoleic	0,0	0,3	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	6,7
C22:1,n-9	Erucic	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
C24:1,n-9	Nervotique	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Polyunsaturated total		31,2	61,4	63,0	52,3	50,3	28,8	39,1	29,4
C16:2,n-4	hexadecadienoic	0,0	0,0	0,0	0,4	4,4	1,4	0,4	0,0
C16:2,n-6		0,0	0,0	0,0	3,6	1,0	0,0	0,6	0,0
C18:2,n-6	Linoleic	22,0	61,4	55,0	11,8	1,5	2,0	2,2	8,5
C16:3,n-3	Hexadecatrienoic	0,2	0,0	0,0	12,1	12,3	2,2	0,0	0,0
C18:3,n-3	α-Linolenic	9,0	0,0	8,0	22,3	0,9	0,1	0,2	5,0
C18:3,n-6	γ-Linolenic	0,0	0,0	0,0	0,3	0,5	3,0	0,7	14,7
C18:3,n-5	α-Eleostearic	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C20:4,n-6	Arachidonic	0,0	0,0	0,0	0,5	0,6	8,5	5,3	0,0
C20:5, n-3	Eicosapentanoic (EPA)	0,0	0,0	0,0	1,3	28,4	11,0	29,7	0,6
C22:6,n-3	Docosahexanoic(DHA)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,6	0,0	0,6

Tableau 18 : composition en acides gras de 3 huiles végétales terrestres et de 5 huiles de microalgues : 4 marines et d'1 d'eau douce.

% masse	SATURES	MONOINSATURES	POLYINSATURES
Huile « idéale »	30	50	20
Colza	7	59	32
Chlorella sp.****	28	17	53
Phaeodactylum tricornutum (MACC B220)***	32	44	15
Cylindrotheca closterium	31	30	29
Nannochloropsis sp.	27	30	40
Chlorella vulgaris	44	12	30
Autres espèces intéressantes			
Nitzschia incerta (MACC/B104)***	29.5	49.9	13.3
Neochloris oleoabundans**	16.3	20	47
Isochrysis galbana Tahiti (Nitrite LS)*	32	34	34

Tableau 19 : Compositions comparées en acides gras de 4 espèces de micro algues avec une huile « idéale » à des fins biocarburants et l'huile de colza.

* sources : Fidalgo 1998_T-iso

** sources : Gatenby 2003.

*** sources : Liang 2000.

**** sources : Zhukova 1995.

Sélection d'espèces pour la production de Biocarburant :

On peut remarquer que *Nitzschia incerta*, *Phaeodactylum tricornutum* et dans une certaine mesure *Isochrysis galbana*, sont proches de l'huile idéale.

Nannochloropsis sp. est acceptable bien qu'un peu trop saturée.

Neochloris oleoabundans est trop polyinsaturée pour ne pas poser de problèmes de stabilité à l'oxydation. C'est également le cas de *Chlorella sp.* bien qu'étant plus saturée.

Tests de qualités de l'espèce retenue :

A la suite de ces recommandations, le projet Shamash a sélectionné certaines espèces proches de « l'huile idéale ».

C'est finalement un lot de biomasse algale issu de *Nannochloropsis* qui a été produit. Celui-ci fourni par le M2P2²⁰ correspond à un volume de 800ml en provenance d'essais d'extraction par CO₂ supercritique réalisés en pilote à partir de biomasse microalgale de *Nannochloropsis*. Il a donc fait l'objet d'une première caractérisation physico chimique en laboratoire.

La composition en acides gras de ce lot est proche de l'idéal, en effet, les carences appliquées lors de la production des microalgues orientent les compositions lipidiques.

% en Masse	SATURES	MONOINSATURES	POLYINSATURES
Huile microalgale CO₂*	36.6	43.7	13.5
Huile idéale	30	50	20
Tournesol	12	21	77
Tournesol oléique	9	75	16
Colza	7	59	32

* *nannochloropsis sp* carencée.

A. Résultats de l'évaporation de gouttelettes d'huile du lot de biomasse algale.

Les tests ont été réalisés à Montpellier en utilisant le dispositif d'évapostalagmométrie à une température contrôlée de 320 °C. Celle-ci s'approche de la température moyenne régnant à l'intérieur d'une chambre de combustion de moteur diesel au moment de l'injection de carburant.

Les gouttelettes d'huile algale ont été comparées à celles des huiles caractérisées précédemment :

- Huile de colza industrielle,
- Huile de colza issue d'un procédé de fabrication artisanale
- Huile de palme
- Huile de coco
- Huile marine (foie de morue)

²⁰ Laboratoire de Mécanique, Modélisation et Procédés Propres (M2P2). CNRS – Université Paul Cézanne – Aix Marseille III. (Elisabeth Badens, Christelle Crampon; C. Nikitine ; K. Ouerd ; Olivier Boutin).

- Fioul domestique.

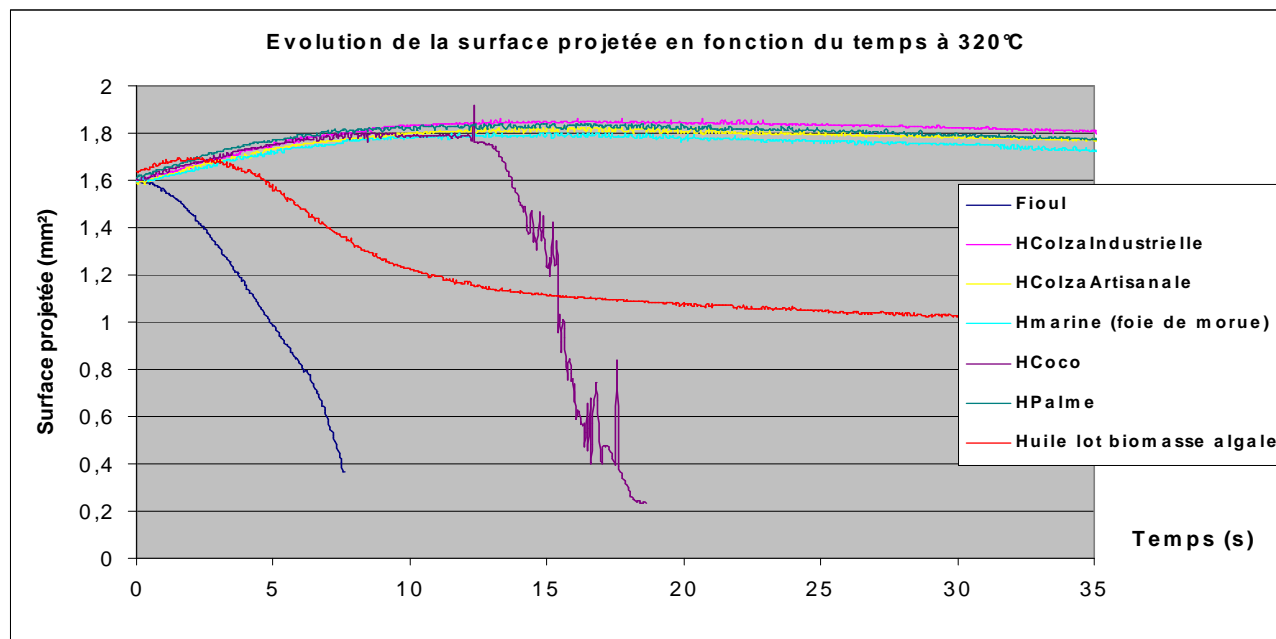


Figure 32 : comparaison de la vaporisation des huiles à 320°C

Les gouttelettes ont un volume d'environ 1 microlitre qui est 4000 fois plus important que le volume moyen des gouttelettes injectées dans la chambre d'un moteur diesel. Les durées d'évaporation obtenues ici, sont donc significativement plus longues que dans un moteur.

- On remarque que le fioul débute son évaporation immédiatement après son introduction dans l'enceinte chauffée. Son évaporation est rapide et complète en comparaison à tous les autres produits.
- La remarque principale est que les huiles ne s'évaporent pas à cette température de 320°C, à l'exception de l'huile de noix de coco qui démarre son évaporation tardivement. Mais celle-ci est complète. L'huile de noix de coco (également appelée huile de coprah) est saturée à 90 %, en ce sens elle est très particulière vis à vis des autres huiles végétales terrestres.
- L'huile de biomasse algale (en rouge) débute son évaporation bien avant l'huile de coco. La moitié du volume de la gouttelette s'évapore puis l'évaporation semble se stopper. Le comportement alors est similaire à celui des autres huiles végétales et de l'huile marine.

B. Résultats de l'évaporation de gouttelettes d'esters méthyliques d'huile du lot de biomasse algale.

Les conditions de ces tests sont identiques à ceux réalisés pour les huiles, soit à une température contrôlée de 320 °C.

Les gouttelettes d'esters méthyliques d'huile algale ont été comparées à celles des esters d'huiles caractérisées précédemment :

- Ester méthylique d'huile de colza industrielle,
- Ester méthylique d'huile de colza issue d'un procédé de fabrication artisanale
- Ester méthylique d'huile de palme

- Ester méthylique d'huile de coco
- Ester méthylique d'huile marine (foie de morue)
- Fioul domestique.
- DDO (Distillate Diesel Oil : produit situé entre le gazole et le fioul lourd)

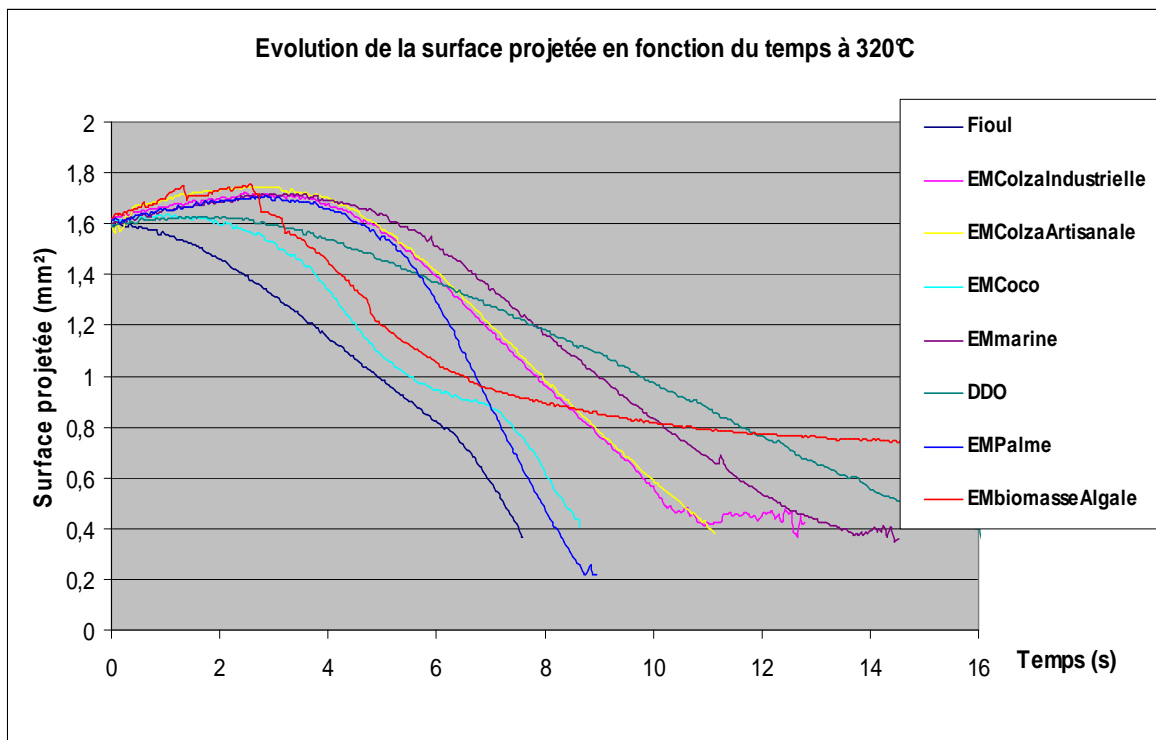


Figure 33 : comparaison de la vaporisation des esters méthylliques à 320°C.

- Fioul et DDO, deux produits pétroliers, donnent une indication de l'enveloppe dans laquelle un ester devrait développer et terminer son évaporation.
- Tous les esters méthylliques terminent leur évaporation avant le DDO.
- L'ester méthylique d'huile de coco présente l'évolution la plus proche de celle du fioul domestique.
- Dans une première phase, l'ester de biomasse algale possède un comportement proche de celui de l'ester de coco qui est essentiellement saturé (90 %). Ceci n'est pas en accord avec la composition globale mesurée (36,6 % saturée, 43,7 % monoinsaturée et 13,5 % polyinsaturée).
- Il s'évapore mieux que l'ester méthylique de colza et le DDO. Cependant, dans une seconde phase, son évaporation ne se s'achève pas et se rapproche du comportement d'une huile non estérifiée. Il demeure donc des incertitudes sur la nature de la part non estérifiée de l'huile de biomasse algale, ainsi que sur sa stabilité dans le temps.

Conclusions sur la qualité de l'huile et de l'ester méthylique de biomasse algale.

L'huile issue du lot de biomasse algale fournie, présente une composition globale en acides gras proche du profil idéal pour une estérification méthylique classique destinée à la production d'un Biodiesel.

Les pouvoirs calorifiques supérieurs de l'huile de biomasse algale et de son ester méthylique sont de mêmes ordres de grandeur que ceux des autres huiles et esters.

- En matière d'évaporation et de prédiction de l'aptitude à l'inflammation, 50% du volume d'huile de biomasse algale s'évapore alors que les autres huiles ne s'évaporent pas du tout (à l'exception de l'huile de coprah, essentiellement saturée).
- L'ester méthylique de biomasse algale possède un comportement proche de celui de l'ester de coco. Il s'évapore mieux que l'ester méthylique de colza et le DDO. Cependant, dans une seconde phase, son évaporation ne se s'achève pas et se rapproche du comportement d'une huile non estérifiée.
- Il semblerait que l'ester méthylique de l'huile de biomasse algale comporte des parts d'huile non estérifiée. Ceci sera à vérifier sur les lots à venir qui seront en quantité plus importantes. Ce qui permettra d'effectuer toutes les analyses relatives à la norme Biodiesel EN 14214

3.1.7 Contribution à l'élaboration de spécifications et normes pour les huiles végétales carburant

L'inadaptation aux huiles végétales des standards pour produits pétroliers a été soulignée dans de nombreuses publications [2] [12] :

- L'indice de cétane ne semble pas comparable entre gazoles et huiles végétales. Une huile de colza présentant un indice de 29 a un délai d'inflammation plus court qu'un fioul à même indice.
- la température de distillation : la norme prévoit que 90 % du produit doit être distillé dans la fourchette 282-338°C. Or il n'y a pas de réelle distillation des huiles végétales mais seulement d'une partie des acides gras, puis décomposition thermique.
- le point de trouble : la norme prévoit 2°C, ce qui exclut l'huile de palme, par exemple, solide à 20°C

On le voit, les huiles végétales sont souvent "hors normes" (voir tableaux 20 et 21) en tant que carburant classique. De plus, la fourchette de valeurs est large parmi les huiles. Dans la perspective d'établir des normes pour les huiles végétales, il convient d'adapter les procédures de tests, d'en éliminer certaines et, en revanche, d'en proposer d'autres plus spécifiques.

Un exemple de ce type d'approche est en cours actuellement pour les huiles de coprah carburant dans les Etats du pacifique, et pour l'huile de jatropha curcas dans plusieurs pays africains.

	Masse volumique (20 °C) g.cm ⁻³	Viscosité (20 °C) mm ² /s	Point d'écoulemen t °C	Point de trouble °C	Point éclair °C	Pouvoir calorifique MJ/kg
Fioul	0,836	6	-18	-9	93	43.8
Ester méthylique de colza	0,880	7	-12	-4	183	41
Coprah	0,915	30*	23/26	28	230	37.1
Palme	0,945	60*	23/40	31	280	36.9
Buriti	0,912 à 25°C	138,3	-4	-		39,08
Ricin	0,955	850-1100	-10 à -20	-	265	37,20
Babassu	0,946	25,5 à 25°C	22/26	26	234	35,28
Coton	0,921	73	-2	1	243	36.8
Pourghère	0,920	75,7	-3	2	236	38.8
Arachide	0,914	85	-1	9	258	39.3
Colza	0,920	78	-6	-4	285	37.4
Soja	0,920	61	-4	-4	330	37.3
Tournesol	0,925	58	-6	-2	316	37.8

Tableau 20 : caractéristiques carburant des huiles végétales.

DOSSIER RÉGLEMENTAIRE

Comité Professionnel Du Pétrole

Mise à jour au 20/01/2005

FUEL-OIL DOMESTIQUE

CSR 441
1er Juillet 2002
annule et remplace la feuille CSR 440 du 18 Janvier 2002

SPECIFICATIONS	a) DOUANIERES		b) ADMINISTRATIVES		c) INTERSYNDICALES
REFERENCES	Loi n° 66-923 du 14/12/66 Arrêté du 01/03/76 du 27/12/01 (8)	J.O. 15/12/66 J.O. 31/03/76 30/12/01	Arrêté du 29/08/67 du 06/12/77 du 28/03/80 du 29/10/87 du 09/08/94 du 28/08/97 du 08/01/98 du 05/06/98 du 11/08/99 (1)	J.O. du 10/09/67 du 14/12/77 du 31/03/80 du 31/10/87 du 20/08/94 du 05/09/97 du 29/01/98 du 12/06/98 du 08/09/99 (1)	
	FOD				
DEFINITION			Mélange d'hydrocarbures d'origine minérale ou de synthèse, et éventuellement d'ester méthylique d'huile végétale, destiné notamment à la production de chaleur dans les installations de combustion et sous certaines conditions d'emploi à l'alimentation des moteurs à combustion interne (2).		
COULEUR			Rouge		
MASSE VOLUMIQUE à 15 °C (NF EN ISO 3675) (NF EN ISO 12185)					Comprise entre 0,830 et 0,880 kg/l
VISCOSITE à 20 °C (NF EN ISO 3104)			Inférieure ou égale à 9,5 mm ² /s à 20° C		3 à 7,5 mm ² /s
TENEUR EN SOUFRE (NF EN 24260) (NF EN ISO 14596)			Inférieure ou égale à 0,2 % (m/m)		Inférieure ou égale à 0,20 % (m/m)
DISTILLATION (NF EN ISO 3405) (3) % (v/v) condensé (pertes comprises)	Moins de 65 % à 250 °C 85 % ou plus à 350 °C		Inférieur à 65 % à 250° C Supérieur ou égal à 85 % à 350° C		
POINT D'ECLAIR (NF T 60-103)			Supérieur ou égal à 55 °C		Compris entre 55 °C minimum et 120 °C
ASPECT			Clair et limpide à 20° C		
TENEUR EN EAU (NF ISO 6296) (4) (NF EN ISO 12937) (5)			Inférieure ou égale à 200 mg/kg		
TENEUR EN EAU ET SEDIMENTS (NF M 07-020) (7)			Inférieure ou égale à 0,10 % (m/m)		
POINT DE TROUBLE (NF EN 23015)			Inférieur ou égal à + 2 °C		
STABILITE A L'OXYDATION (NF EN ISO 12205)			Inférieure ou égale à 25 g/m ³		
POINT D'ECOULEMENT (NF T 60-105)			Inférieur ou égal à - 9 °C		
TEMPERATURE LIMITE DE FILTRABILITE (NF EN 116)					Inférieure ou égale à - 4 °C
RESIDU DE CARBONE (sur le résidu 10 % de distillation) (NF ISO 6615) (6) (NF EN ISO 10370)			Inférieur ou égal à 0,35 % (m/m)		Inférieur ou égal à 0,30 % (m/m) (valeur basée sur un produit exempt d'améliorateur de cétane).
INDICE DE CETANE (NF EN ISO 5165)			Supérieur ou égal à 40		
COLORANT	La couleur sera obtenue par addition de 1 g/l de rouge écarlate (ortho-toluène-azo-ortho-toluène-azo-béta-naphtol) ou tout autre colorant autrement dénommé mais chimiquement identique.				
AGENTS TRACEURS (8)	Diphénylamine Furfural Solvent Yellow 124				
	Présence des traceurs nationaux (diphénylamine et furfural) et / ou du traceur européen SY 124 en respectant obligatoirement le taux minimal suivant, au cours de la période de transition du 31/12/2001 au 31/07/2002 ; avec 0 ≤ a ≤ 1 : a x (50 mg/l de diphénylamine + 10 mg/l de furfural) + (1-a) x 6 mg/l de SY 124				A compter du 15/02/2002 présence obligatoire du SY 124 au taux minimal de 6 mg/l pour les expéditions par moyens massifs (pipeline, fer, bateau) provenant des raffineries et des points d'importation à destination des dépôts
CONDUCTIVITE ELECTRIQUE (9) ISO 6297 - 1997 (mesure) NF EN ISO 3170 (prélèvements)					150 pS / m à 20°C au minimum à compter du 1er septembre 2002 (voir note 9) (seul additif antistatique autorisé : Stadis 450)

Tableau 21 : norme pour le fioul domestique (2005).

Etude de la définition d'une norme carburant HVP jatropha destinée aux usages en milieu rural au Mali.

Préambule :

(le *Jatropha curcas* est également appelé pourghère dans l'espace francophone).

Le *Jatropha* est une plante ancienne. Des formes fossiles datant de l'ère tertiaire auraient, en effet, été découvertes au Pérou. Son origine serait l'Amérique centrale ou le Mexique. Le Pourghère se présente sous la forme d'un arbre ou arbuste de 2 à 6 m de hauteur. L'arbre donne des fruits de couleur marron foncé qui contiennent 1 à 3 graines riches en huile (40 % sur sec). Le Pourghère est couramment utilisé pour réaliser des clôtures autour des jardins, ou le long des chemins. La plante et l'huile contiennent des toxines, ce qui évite à ses parties aériennes d'être dévorées par les animaux. Sur de bons sols et avec une bonne irrigation ou pluviométrie, on lui attribue des rendements dépassant 3000 litres d'huile par hectare. Mais sa capacité à résister à la sécheresse en a fait une « plante miracle » par l'extrapolation de ces rendements aux immenses espaces semi-arides des pays en développement (moins de 200 l/ha sous 300 mm d'eau).

Les projets de *Jatropha* Biodiesel, à destination de l'hémisphère nord, ont laissé la place aux usages locaux, en particulier comme source d'accès à l'énergie des zones rurales.



Photo 5 : arbustes de *jatropha curcas* en Afrique [36].

Introduction.

Une norme tient compte des propriétés du produit, de son usage envisagé et du profil des utilisateurs. Le domaine d'application de l'HVP *jatropha curcas* a été défini par l'ANADEB²¹ : il s'agit de l'utilisation directe de l'huile issue de cette plante comme substitut du gasoil dans les moteurs diesels en zone rurale.

L'esprit du législateur est autant de donner un cadre garantissant une qualité aux utilisateurs que de permettre le développement de la production et de l'usage de cette huile carburant au profit des populations rurales les plus défavorisées.

Les exigences techniques, aussi bien en termes de spécifications que de protocoles d'analyses, doivent prendre en compte ce champ d'application.

Une norme est évolutive, elle s'adapte en fonction des évolutions du produit et des souhaits des clients. Elle s'adapte également au contexte économique, social et environnemental.

Compte tenu de ces éléments, il n'est pas apparu adapté de reproduire les propositions de normes HVP (essentiellement colza) actuellement en cours en Europe. En effet, le champ d'application de ces dernières concerne l'utilisation d'HVP pure ou en mélange dans les gazoles pour véhicules automobiles. Elles ne s'appliquent pas aux usages agricoles ou à poste fixe.

²¹ ANADEB : Agence Nationale de Développement des Biocarburants
Page 86 sur 202

La présente proposition de norme a été établie en fonction de ces critères. Afin de clarifier l'examen de cette proposition, il est utile de préciser que celle-ci ne couvre pas l'application carburant banalisée dans les stations de distribution à l'échelle nationale.

➤ **Construction d'une norme.**

Que ce soit pour des produits à destination carburant ou pour tout autre type de produit et d'usage, une norme a pour objet de donner satisfaction au consommateur et au producteur sur une base d'entente commune, garantissant une qualité de produit. L'application d'une norme peut être facultative ou obligatoire. La décision appartient aux autorités compétentes selon les intérêts de l'Etat, des clients et des fabricants.

Une norme se construit en trois étapes principales :

- **Les propriétés caractéristiques :**

L'étude des caractéristiques du produit permet la sélection de celles intéressant l'application visée.

Les éléments sélectionnés doivent permettre de répondre aux exigences, à savoir satisfaire les besoins ou les attentes qui sont exprimés ou implicites.

Ces caractéristiques spécifiques constituent alors, le plus souvent, des documents appelés spécifications.

- **Les spécifications :**

En règle générale, les spécifications posent le cahier des charges du produit, en encadrant les valeurs exigées des caractéristiques spécifiées.

Ce document peut être le résultat :

- * d'un accord privé entre le fournisseur et le client;

- * d'un accord plus large qui implique les différentes parties (fournisseurs, clients, autres parties) intéressés à mettre en place une spécification commune pour une application continue ou répétée.

- **La norme :**

Un tel accord devient une norme si elle est approuvée par un organisme de normalisation reconnu, soit national, soit international.

Si les autorités nationales en décident par un arrêté, la norme s'applique alors dans le pays selon les modalités définies.

➤ **Etablissement d'une norme carburant.**

Les normes sont établies sous la contrainte des caractéristiques naturelles du carburant.

Propriétés caractéristiques du carburant :

Elles reflètent la composition physique et chimique d'un combustible. Par conséquent, elles décrivent la relation entre sa composition et ses propriétés en tant que carburant.

Des propriétés comme la densité, la viscosité, la volatilité ne peuvent être modifiées sans modification de la composition du carburant.

Egalement liées à ses caractéristiques se dégagent des propriétés de «comportement» du carburant comme le point de trouble, la température limite de filtrabilité, etc.

On trouvera en annexe 1 un exemple de caractéristiques spécifiques à un usage carburant. Toutes ces caractéristiques ne sont pas nécessairement reprises dans l'établissement des spécifications.

Spécifications relatives aux carburants :

Les spécifications sont établies afin de correspondre à une qualité requise des combustibles en relation directe avec leur utilisation finale (automobile, aviation, marine, poste fixe, combustion et chaleur, ...).

La qualité recherchée, elle-même, est liée à la durabilité du moteur, la performance, le niveau des émissions.

Elles sont établies afin de garantir une correspondance entre les carburants commercialisés et l'exigence des consommateurs. Les spécifications peuvent indiquer les valeurs des composés majeurs et des propriétés principales du carburant, mais elles fixent aussi la teneur maximale autorisée de constituants mineurs et d'éléments indésirables.

Normes sur les carburants :

Les normes sont des spécifications approuvées par les gouvernements, les fabricants et les utilisateurs.

Les normes carburant peuvent être établies et réglementées pour des raisons commerciales, environnementales ou d'opérabilité.

Limitation de l'application de normes pour carburants fossiles aux biocarburants :

Comme mentionné précédemment, les normes reflètent les propriétés, liées à la composition chimique et les critères de qualité, à respecter en relation avec l'utilisation finale. Les normes pour combustibles fossiles ne peuvent pas être appliquées sans adaptation aux particularités des biocarburants.

Toute modification chimique importante aura un impact sur les propriétés, par exemple : la viscosité. Le fioul lourd ainsi que de l'huile de pourghère ne peuvent pas respecter la viscosité indiquée pour la norme Gazole Routier. C'est pourquoi le fioul lourd et l'huile de pourghère ne sont pas applicables et négociables comme carburant automobile du point de vue de la norme.

Mais dans des moteurs adaptés, des mélanges gazole et huile de pourghère pure sont des carburants qui conviennent pour les applications automobiles.

Éléments à considérer pour une norme de qualité des biocarburants locaux

Les biocarburants doivent respecter la politique en faveur des biocarburants durables et toutes les lois applicables du pays dans lequel ils sont produits.

Les normes de qualité des biocarburants produits localement doivent satisfaire à l'exigence d'une amélioration constante vers la performance environnementale.

Les normes doivent également prendre en considération le contexte socio-économique, particulièrement dans les collectivités rurales. Trop d'exigences, au départ, sur la qualité peuvent être un obstacle au démarrage d'une production et à l'utilisation.

➤ **Proposition d'une norme HVP carburant pour l'huile de pourghère produite localement.**

Comme mentionné en introduction, les normes sont conformes à l'utilisation finale.

La qualité comme combustible de l'huile de pourghère produite au niveau local à petite échelle est sensible aux modes de collecte, de stockage et d'extraction de l'huile. Un avertissement sur la responsabilité de l'utilisateur ainsi qu'un guide des bonnes pratiques pour les producteurs doivent être préparés et diffusés par les autorités nationales.

L'huile de pourghère HVP n'est pas un carburant fossile pour moteurs diesels et doit être utilisée seulement dans des moteurs aptes à la brûler ou adaptés.

L'huile de pourghère HVP n'a pas les mêmes propriétés que l'huile de colza, par conséquent la norme allemande ne peut pas être utilisée sans une adaptation aux particularités de l'huile de pourghère.

Les spécifications suivantes sont proposées afin d'établir une norme pour l'huile de pourghère (*Jatropha curcas*) HVP carburant. Elles représentent une première étape vers un standard de qualité des biocarburants au Mali.

Proposition de normes HVP-jatropha

Proposition de Normes HVP carburant pour l'huile de pourghère (jatropha curcas)				
Caractéristiques/teneurs	Unités	Min.	Max.	Méthode de test
Spécifications propres à l'huile de pourghère				
Masse volumique à 15°C	Kg/m ³	0,900	0,930	NFEN ISO 12185
Point éclair	°C	200	-	N FEN ISO 2719
Viscosité (cin. @ 40°C)	mm ² /s	30	38	NF EN ISO 3104
Résidu carbone	Mass %	-	0,40	EN ISO 10370
Teneur en Soufre	mg/kg	-	10	NF EN ISO 20846
Indice d'iode		90	120	NF EN ISO 3961 ou NF EN 14111
Propriétés variables				
Sédiments	mg/kg	-	50	NF EN 12662*
Indice d'acide	mg KOH/g	-	10	EN 14104
Teneur en Phosphore	mg/kg	-	50 – 80**	EN 14107
Teneur en cendres	Mass %	-	0,02	NF EN ISO 6245
Teneur en eau	Mass %	-	0,100	NF EN ISO 12937

* : avec réchauffage de l'échantillon et du solvant utilisé avant mélange, de telle façon à obtenir une viscosité du mélange comprise entre 5 et 8 mm²/s.

** : le seuil souhaitable est de 50 ppm. Une tolérance à un maximum de 80 ppm peut être acceptable pour certains échantillons d'un même opérateur.

Tableau 22 : proposition de norme pour l'huile de jatropha (pourghère) au Mali.

Discussion sur les différentes teneurs retenues :

- Masse volumique :

La moyenne des mesures observées est de 0,917 à 15°C.

La valeur de 0,930 correspond à la masse volumique de l'huile de coton. Celle de 0,900 à l'introduction de 25% de gasoil.

- Point éclair :

Le point d'éclair n'est pas significatif pour un fonctionnement de moteur. Il est une valeur indiquant le risque d'incendie. Il est important pour la classification dans les classes de danger (décisive pour le stockage, le transport et les assurances).

- Viscosité cinématique :

La moyenne des mesures observées à 40°C est de 35,6. La limite de 38 correspond à une valeur maximum pour ce type d'huile, compte tenu de sa composition en acides gras.

- Résidu carbone :

La valeur de 0,40 sur masse totale est la limite adoptée pour les huiles mono et di insaturées utilisées en HVP.

- Teneur en Soufre :

Une haute teneur en soufre et une faible température des composants mécaniques peut entraîner une usure accrue en raison de corrosion acide.

Une teneur en soufre supérieure à 10 ppm peut influencer sur les intervalles de vidange

Indice iode max 120

d'huile de lubrification.

L'indice d'iode permet de se rendre compte de l'insaturation d'une huile : il varie entre 0 et 200 : plus une huile est insaturée, plus l'indice d'iode est élevé. La valeur de 120 correspond à celle de l'huile de coton. La valeur minimum de 90 permettant d'écarter les mélanges d'huile de jatropha et de produits d'origine minérale.

- Sédiments (ou contamination totale) :

Les sédiments sont des solides (impuretés métalliques, poussière, rouille, tartre) qui provoquent l'usure dans le système d'injection et la chambre de combustion et qui nuisent à l'étanchéité des soupapes. Dans le cas des HVP se rajoutent aux premiers :

- des hydrates de carbone,
- des matières azotées,
- diverses résines,
- des savons,
- des acides gras oxydés.

En pratique, on observe des taux de sédiments plus élevés qu'avec les produits pétroliers mais qui sont dus à des matières non abrasives.

Un taux maximum de 50 est réalisable si l'huile de jatropha a été filtrée correctement.

- Indice d'acide :

L'indice d'acide est la masse de KOH nécessaire pour neutraliser les acides gras libres présents dans 1g d'huile.

Un indice d'acide maximum de 10 mg KOH/g correspond à une acidité oléique ou linoléique de 5 %. Ce taux n'est pas une contrainte pour un usage HVP. En revanche ceci permet de ne pas éliminer des huiles de pourghère dont l'acidité peut présenter des taux élevés, comparée à celle d'autres huiles comme le coton, dus au mode de collecte et de stockage des graines. Ce taux n'est pas une contrainte à l'utilisation directe en moteur diesel, les acides gras libres améliorant l'aptitude à l'autoinflammation de l'HVP.

- Teneur en phosphore :

Le taux de phosphore est un critère important de qualité de l'huile végétale, car il est un indicateur du taux de phospholipides présent dans l'huile. Le taux de ces derniers dans l'huile est lié au mode de pressage. Plus on détériore la membrane cellulaire de la graine, plus la quantité en phosphore sera importante dans l'huile.

Un seuil de 50 ppm avec une tolérance de 80 ppm ouvre à l'utilisation d'équipements rustiques d'extraction. De plus, des fonctionnements de moteurs diesels sur de longues durées ont été observés avec des taux de 50 ppm.

- Teneur en cendres :

Le taux de cendres est le résidu minéral après destruction de la matière organique par calcination à 500°C. Constituées de matières non combustibles très diverses (oxydes de silicium, fer, calcium, etc...) les cendres constituent des abrasifs dont il est indispensable de débarrasser le carburant avant son introduction dans le réservoir. Un taux de 0.02 % est recommandé.

- Teneur en eau :

Une trop grande teneur en eau conduit à la corrosion et à la formation de sédiments et de boues dans les réservoirs. Elle a également des effets lors du stockage de l'huile en facilitant l'apparition de développement microbiens. Les micro-organismes (bactéries, levures, champignons) vivent dans l'eau, mais utilisent la présence environnante d'oxygène, d'hydrogène et d'hydrocarbures pour se nourrir et se développer. Ils génèrent des produits de dégradation solides et acides qui peuvent provoquer corrosion et bouchage des filtres.

Un taux maximum de 0.1 % est recommandable dans le domaine d'application visé.

Discussion sur les caractéristiques non retenues :

Caractéristiques <u>non retenues</u> dans la proposition de Normes HVP carburant pour l'huile de pourghère (jatropha curcas)				
Caractéristiques/teneurs	Unités	Min.	Max.	Méthode de test
Spécifications propres à l'huile de pourghère				
Pouvoir Calorifique Sup.	MJ/kg	36	-	NF ISO 70 030
Indice de cétane calculé		35	-	NF EN ISO 4264
Indice de cétane mesuré				EN ISO 5165
Propriétés variables				
Stabilité à l'oxydation (110°C)	h	4		EN 14112
Ca+ Mg	ppm		20	

Tableau 23 : proposition de norme pour l'huile de jatropha (pourghère) au Mali. Caractéristiques non retenues dans la norme proposée.

- Pouvoir calorifique supérieur sur brut :

Les différentes déterminations observées avec l'huile de jatropha situent un minimum à 37 MJ/kg. Des valeurs inférieures sont dans la majorité des cas dues à des teneurs en eau très au delà du seuil limite défini. Cette détermination apparaît coûteuse et peu utile.

- Indice de cétane (mesuré ou calculé) :

L'indice de cétane des huiles végétales n'est interprétable qu'en termes de comparaison entre les différentes huiles. Les différents lots d'huile de jatropha présenteront des valeurs d'indice peu variables. Là aussi, Cette détermination apparaît coûteuse et peu utile.

- Stabilité à l'oxydation :

L'huile peut s'oxyder ou polymériser en partie pendant le stockage prolongé. Cela peut conduire à la formation d'insolubles (verniss typique des peintures) provoquant le colmatage des filtres et le blocage des composants tels les pompes.

Le domaine d'application, champ de la présente proposition, ne devrait pas favoriser l'apparition de stockages de longues durées et de grosses capacités. Par ailleurs, la procédure de détermination EN 14112 s'applique aux esters méthyliques d'acides gras (EMAG) et consiste en un essai d'oxydation accélérée. Ce qui semble plus adapté est une détermination d'un état d'oxydation de l'huile de jatropha sujette aux tests de la norme. La norme NF EN ISO 12205 applicable aux distillats moyens de pétrole fait l'objet d'une évaluation en laboratoire de même que la mesure de l'indice de peroxyde NF EN ISO 3960, et la détermination de l'indice d'anisidine NF EN ISO 6885.

Nous proposons que la stabilité à l'oxydation soit écartée provisoirement de la norme HVP jatropha, en attendant une proposition mieux adaptée.

- Calcium et Magnesium (Ca+Mg) :

Ces deux métaux alcalins ne sont pas responsables de corrosion mais se retrouvent dans les dépôts formés autour des sièges de soupapes. Compte tenu des contextes très différents entre les exigences européennes en matières de carburant automobile et le domaine d'application de l'HVP jatropha en milieu rural, il n'apparaît pas utile de retenir des seuils limites sur ces éléments. Par ailleurs, différentes analyses sur des lots d'huiles de jatropha produites au Mali indiquent des taux de 30 à 70 ppm, la teneur maximale pour la norme européenne EN 14214 étant actuellement fixée à 20 ppm.

Cette proposition de norme a été retenue par le Mali, elle entrera en application en 2013.

3.2. Optimisation de la combustion des huiles végétales carburant

3.2.1 Etude de l'influence d'un additif procétane, le nitrate d'Héxyle, et de la température de l'air admis sur les délais d'inflammation des huiles végétales dans un moteur Diesel.

Cette étude a fait l'objet d'une publication²².

De nombreux travaux [24] [12] attribuaient les problèmes de combustion à la forte viscosité des huiles végétales, de 8 à 15 fois supérieure au gazole à 20°C. Une amélioration semble apparaître lorsque l'on réduit cette viscosité, par un réchauffage énergétique (145°C) de l'huile injectée, seule méthode simple, avec les mélanges huiles-gazole, pour retrouver les caractéristiques d'injection du gazole.

Si l'action sur la viscosité, des huiles apparaît bénéfique, elle ne résout pas les problèmes d'encrassement rencontrés dans les diesels à injection directe ou semi-directe.

La diminution du délai d'inflammation, sans modifier la viscosité des huiles, conduit-elle à une amélioration notable du fonctionnement d'un moteur diesel sensible aux propriétés des carburants ?

Méthodes :

Deux méthodes ont été utilisées :

- l'augmentation de l'indice de cétane grâce à un accélérateur chimique de la combustion. Nous avons utilisé du nitrate d'HEXYLE, bien connu comme améliorant d'indice de cétane efficace quels que soient les carburants [25], additivé à 4 et 8 % pour ramener les délais plus longs des huiles autour des valeurs enregistrées avec du gazole.
- la diminution du délai d'inflammation en augmentant la température de l'air à l'admission, augmentant ainsi la température dans la préchambre au moment de l'injection.
Nous avons simplement préchauffé l'air d'admission à différentes températures de 85 à 145°C (+60°C à +120°C) tout en restant en aspiration naturelle.

Cinq huiles ont été testées, dont 2 avec le nitrate d'HEXYLE, le comportement de l'évolution de leur délai est comparé à celui d'un gazole courant.

Le tableau suivant indique cette sélection d'huiles qui sont caractérisées en fonction des résultats de recherche présentés dans le chapitre précédent : pourcentages d'acides gras, indices de cétane mesurés et, dans le cas de l'huile de coton, l'utilisation de son huile brute fortement acide (acidité : 38.35, soit 19 % d'acides gras libres).

²² G. Vaitilingom, Higelin P., Andrzejewski J., Sapinski A., 1992. Influence du nitrate d'hexyle et de la température de l'air admis sur les délais d'inflammation des huiles végétales dans un moteur diesel. Entropie, n°161, p. 39-43.

Types d'huiles	Indices		Pourcentages d'acides gras				Acidité
	Iode	Cétane	Saturés	Insat.	Di-Insat.	Tri-Insat.	
palme brute	49,5	43	52,4	38,1	9,2	0,2	7,65
coton brute	115,0	39	24,0	22,6	53,1	0,2	38,35
coton neutre	11,6	37	26,2	20,1	53,2	0,2	0,10
colza raffinée	117,6	35	7,4	59,5	22,8	10,1	0,05
ester méthyl colza	118,7	52	7,4	59,1	22,0	11,3	0,15

Tableau 24 : caractéristiques des 5 huiles végétales retenues pour l'étude de l'influence du nitrate d'hexyle.

Les essais ont été réalisés avec Pascal Higelin, chez le Professeur Andrzej Sapinski du Laboratoire de Machines Thermiques (M.E.L.) de l'Institut Polytechnique de Varsovie, sur le moteur MWM monocylindre expérimental décrit dans le paragraphe 3.1.2.

Résultats et commentaires :

Dans la figure 34, on retrouve les évolutions de délai d'inflammation relevées dans le chapitre précédent : similitude de comportement mais délais plus importants pour les huiles végétales, elles-mêmes se distinguant les unes des autres.

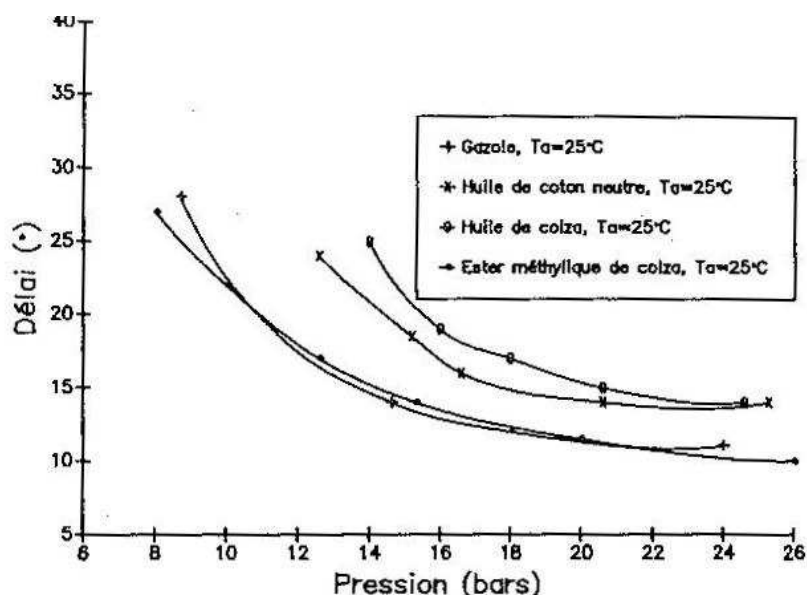


Figure 34 : délai d'inflammation en fonction de la pression dans la chambre séparée en début d'injection (moteur MWM).

➤ Action du nitrate d'héxyle :

Les figures 35 et 36 représentent l'évolution des délais avec addition de 4 et 8 % de nitrate d'héxyle dans les deux huiles.

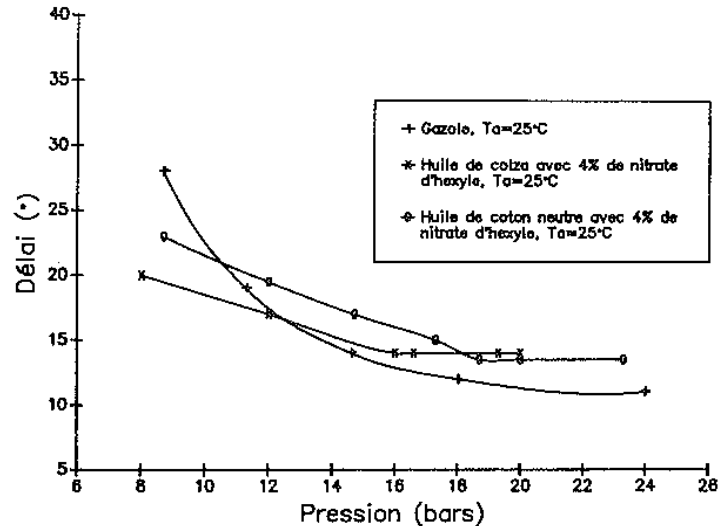


Figure 35 : délai d'inflammation en fonction de la pression dans la chambre séparée en début d'injection. Les huiles végétales sont additivées de 4 % de nitrate d'hexyle.

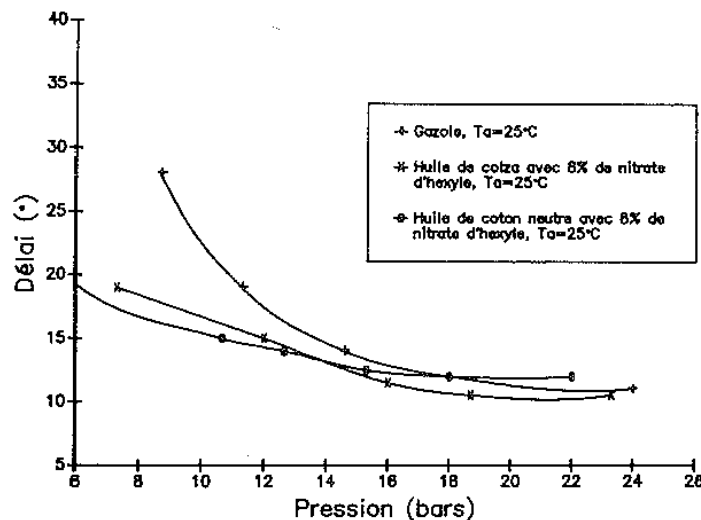


Figure 36 : délai d'inflammation en fonction de la pression dans la chambre séparée en début d'injection. Les huiles végétales sont additivées de 8 % de nitrate d'hexyle.

- 4 % de nitrate d'héxyle produisent un effet pratiquement nul dans la zone de pressions élevées. Cela pourrait être intéressant dans la zone normale d'utilisation (22-26 bars), seulement pour les moteurs présentant une avance à l'injection importante et un faible taux de compression (injection directe).
- 8 % de nitrate d'héxyle ramènent le délai des huiles les plus longues à s'enflammer (colza raffinée, coton neutralisée) autour des valeurs du gazole. Ce taux d'additifs est assez élevé et rend cette solution économiquement inacceptable.

➤ Influence de la température de l'air à l'admission :

On a réchauffé l'air à l'admission à une température de 105°C. On voit sur la figure 37 que le comportement est similaire à celui relevé à air admis à 25°C, seules les valeurs de délai des huiles se rapprochent de celle du gazole. On relève moins de 2 degrés vilebrequin au lieu de 5 précédemment.

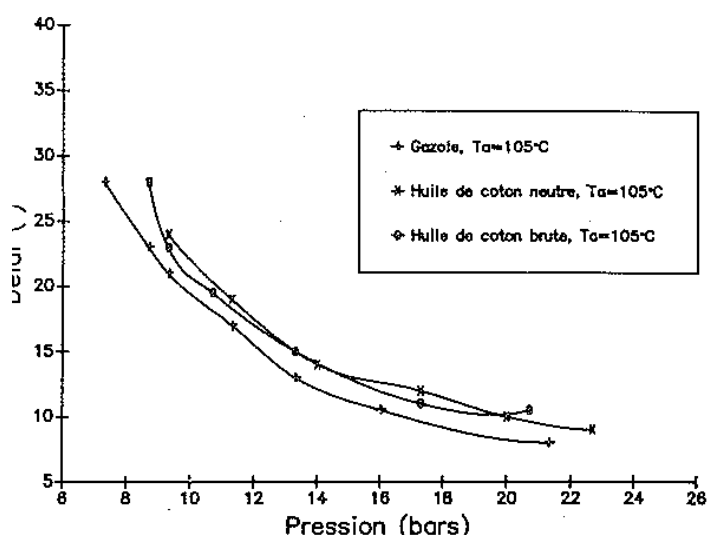


Figure 37 : délai d'inflammation en fonction de la pression dans la chambre séparée en début d'injection. Température d'air à l'admission : 105°C.

La figure 38 compare les délais des huiles à 105°C d'air admis à ceux du gazole à la température ambiante de 25°C. On observe ainsi qu'une augmentation de 80°C de l'air admis permet aux huiles végétales de présenter la même évolution de délai que le gazole avec un air à l'admission non réchauffé.

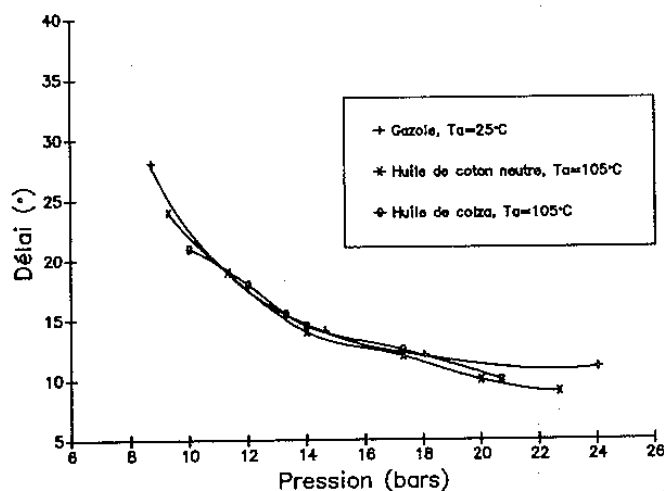


Figure 38 : délai d'inflammation en fonction de la pression dans la chambre séparée en début d'injection. Température d'air à l'admission : gazole = 25°C, huiles végétales = 105°C.

Conclusions :

Nous avons vérifié qu'il est toujours possible d'agir sur le délai d'inflammation des huiles végétales, soit de façon chimique soit de façon physique sans avoir à modifier leurs viscosités ni le moteur.

L'influence du nitrate d'héxyle ou de la température d'admission sur le délai d'inflammations, s'appliquent de la même façon à toutes les huiles végétales essayées, qu'elles soient saturées ou insaturées, brutes ou raffinées. Aucune huile n'est moins sensible qu'une autre à ces actions.

Un faible pourcentage de nitrate d'héxyle peut représenter une solution simple, si et seulement si, le problème d'adaptation ne concerne que le délai d'inflammation (moteur à chambre de turbulence trop froid par exemple).

La température au moment de l'injection semble avoir une influence plus prépondérante encore sur le délai d'inflammation des huiles végétales que sur celui des fuels et gazoles.

Le délai d'inflammation des huiles végétales n'est qu'un élément du processus complet de la combustion. Lors de nos essais nous avons constaté que dans certain cas, bien que le délai soit rattrapé, le développement de la combustion n'était pas forcément satisfaisant.

3.2.2 Constats de l'influence des aspects thermiques sur le comportement des huiles végétales dans un moteur Diesel.

Cette étude a fait l'objet d'une publication²³

Plus concrètement, lors des essais décrits dans le paragraphe précédent, on avait observé la formation de dépôts caractéristiques de la combustion des huiles végétales sur un petit hublot en quartz donnant un accès optique dans la préchambre du moteur MWM. Nettoyé entre chaque test, ce hublot nous donnait un aperçu très qualitatif de la bonne ou moins bonne combustion des huiles testées.

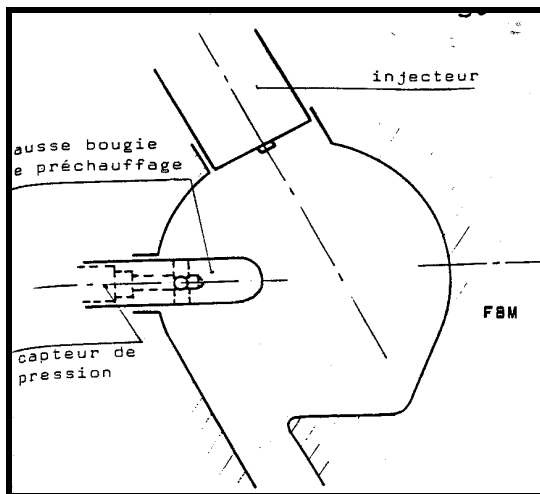
Ces observations nous ont permis d'avancer vers certaines hypothèses. En effet, nous avons remarqué :

- Qu'il n'y avait pas de différences (toujours des dépôts) quelle que soit l'huile testée,
- Qu'il y avait toujours des dépôts même quand, après l'addition de 8 % de nitrate d'héxyle, bien que les délais des huiles étaient identiques à ceux du gazole,
- Que ces dépôts semblaient quantitativement réduits avec de l'air d'admission à 105°C et des pressions élevées au moment de l'injection,
- Que les dépôts disparaissaient quand on plaçait et alimentait une bougie électrique de préchauffage dans la préchambre, ceci indépendamment de toute autre condition sur la température de l'air ou la restriction sur l'admission.

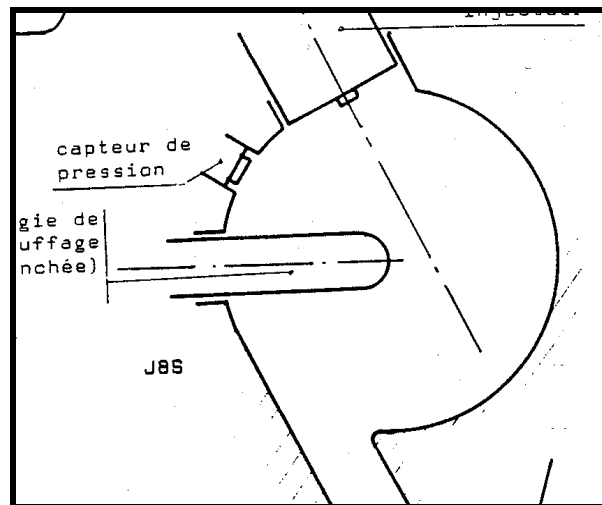
²³ C. Jalinier, J. Andrzejewski, G. Vaitilingom, A. Sapinski, 1990. Détermination des conditions nécessaires au bon fonctionnement des moteurs diesels alimentés avec de l'huile de coton. Entropie, n° 148, p. 69-73.

Lors des travaux de thèse de Ch. Jalinier [26], des essais avaient été réalisés sur la même installation de Varsovie.

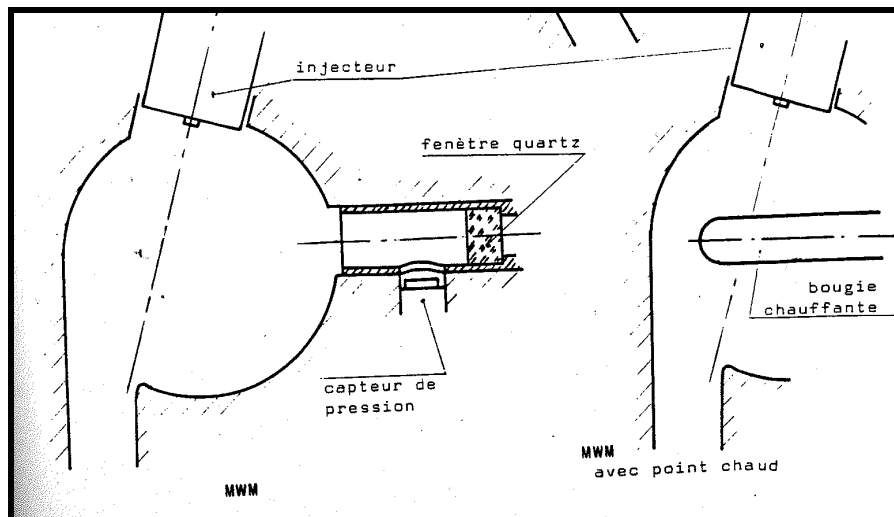
Il avait mesuré des délais d'inflammation de l'huile de coton plus longs que ceux du gazole dans ce moteur MWM (nous fîmes les mêmes constats). Alors que, dans deux autres moteurs Diesels à injection indirecte, les délais étaient plus courts pour le coton que pour le gazole. En observant la forme des chambres de combustion, il a remarqué que l'injecteur du moteur MWM avait été positionné de telle façon que le jet, dirigé vers le canal de transfert, ne « touchait » pas les parois de la chambre, alors que ce devait très certainement être la cas dans les deux autres moteurs. Les schémas ci-dessous décrivent assez bien les différences entre les 3 moteurs.



Chambre de moteur F8M Renault



Chambre de moteur J8S Renault



Chambre du moteur MWM BASF du laboratoire MEL de Varsovie.

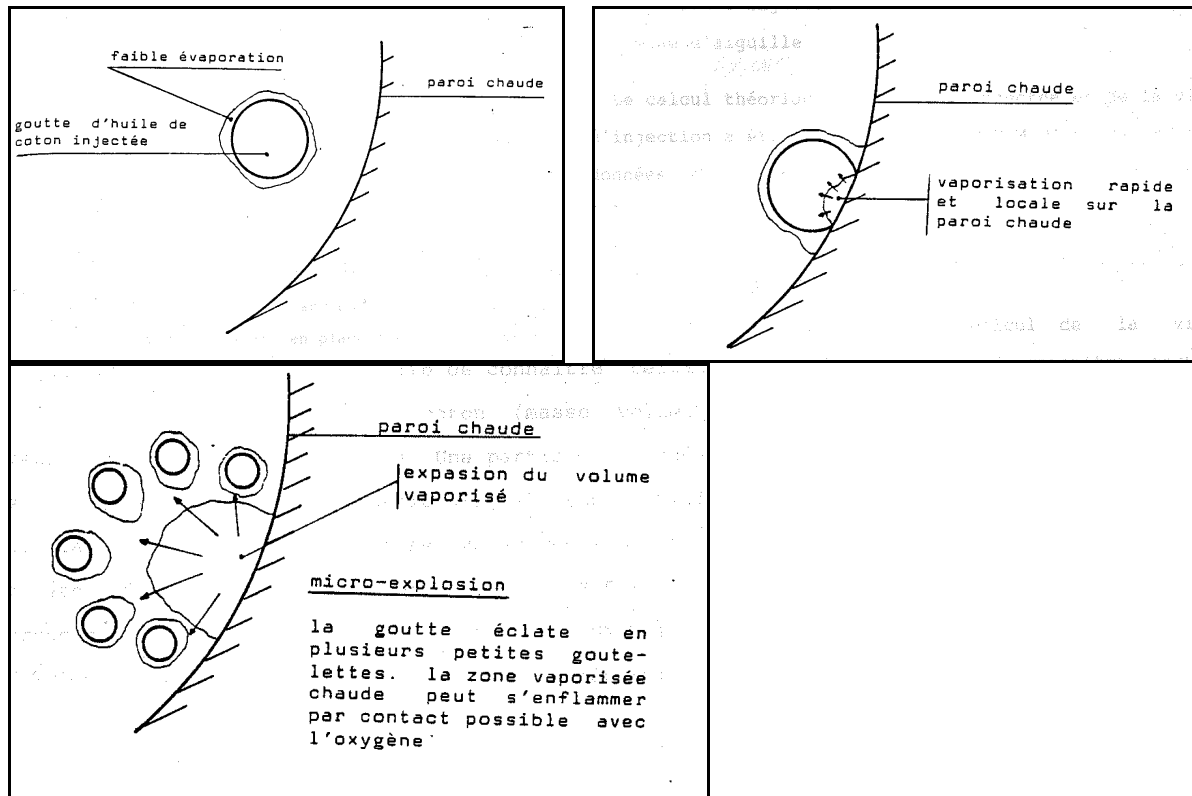
L'installation d'un « point chaud » sur le trajet du jet avait pour effet de permettre une inflammation plus précoce dans le cycle.

Comme nous avons observé que la seule diminution de délai ne suffisait pas à empêcher la formation des dépôts, ce « point chaud » devait également avoir un effet significatif sur le déroulement de la combustion.

Par ailleurs, nos essais sur le F8M puis le J8S, tous deux à injection indirecte avec des chambres RICARDO COMET, avaient confirmé les tendances déjà décrites dans certaines publications, c'est-à-dire pas de formation de dépôts !

En conclusion, les huiles végétales de par leurs caractéristiques chimiques, voient leurs comportements plus influencés par l'apport de chaleur que les carburants pétroliers.

Cette hypothèse de « point chaud » susceptible de raccourcir le délai et d'améliorer la combustion, comme proposé par Jalinier dans le schéma suivant, a été testée et appliquée sur plusieurs installations de production d'électricité en Afrique²⁴



Mais l'application sur de l'injection directe, moteur Perkins 6.354, ne donna aucun résultat positif, comme le démontra une expérimentation menée en commun (ESEM devenue Polytech'Orléans et CEEMAT devenu CIRAD)²⁵.

C'est Pascal Higelin qui apporta la démonstration de l'incidence des aspects thermiques sur la combustion des huiles végétales en moteur Diesel [27].

²⁴ **Vaitilingom G.**, 1988. Modification de deux moteurs DUV ANT pour l'utilisation d'huile de coton comme carburant. Travaux effectués pour la Compagnie Française pour le Développement des fibres Textiles.

²⁵ **Scholl P.**, 1990. Versuche mit Gemischen von Rapsöl und Dieselkraftstoff mit verschiedenen motorischen Veränderungen.(motor Perkins 6.354-4). Rapport de fin d'études, ESEM/CEEMAT, 66 p.

3.2.3 Optimisation de la combustion des huiles végétales dans les brûleurs.

Cette étude a fait l'objet de trois publications^{26 27 28}.

C'est l'ADEME qui nous a incités à travailler sur l'utilisation des huiles végétales dans les brûleurs en particulier pour le séchage des produits agricoles. Cette application connaît un développement encore modeste sur le territoire français, sauf pour l'usage d'huiles de friture usagées. En revanche, les agro-industries d'Afrique de l'Ouest s'y intéressent depuis 2003.

Pour nous, plutôt spécialisés en moteur diesel cela représentait un autre champ d'investigation et des équipements différents.

Plusieurs contrats ont permis des travaux d'approche qui nous ont conduits à établir les liens entre cette application et tous les enseignements accumulés dans l'étude des huiles végétales pour moteurs diesels.

Les travaux de thèse de T. Daho [30] ont eu pour objet de poser cette application en termes de recherche scientifique.

3.2.3.1 Etude comparative du comportement d'un brûleur à fioul domestique non modifié fonctionnant aux mélanges d'huile végétale de coton et de fioul.

L'utilisation de mélanges d'huile végétale et de fioul peut être intéressante dans des applications du type « circuits courts » : production d'électricité, production de chaleur etc. Dans le cas du Burkina Faso en particulier, l'utilisation de l'huile de coton en mélange au FOD ou DDO (*Distillate Diesel Oil*) dans les brûleurs pourrait être une alternative dans la production de vapeur d'eau et d'eau chaude pour les huileries artisanales (qui utilisent pour cela du bois), les boulangeries (utilisant du DDO) etc.

Introduction

L'utilisation des huiles végétales, pures ou en mélange au fioul oil domestique (FOD) dans les brûleurs peut s'avérer intéressante du fait des caractéristiques énergétiques des huiles très proches de celles du fioul. J'avais déjà établi dans deux publications précédentes, que des précautions devaient être prises pour assurer une bonne combustion. En effet, compte tenu de certaines spécificités des huiles végétales (nature physique et chimique notamment), on rencontre des problèmes d'allumage, d'encrassement des parties froides (déflecteur notamment) et d'égouttage d'imbrûlés lorsqu'elles sont utilisées comme telles dans des brûleurs à fioul non modifiés (surtout pour les petites puissances). Pour cela, on peut, soit adapter le brûleur à l'huile végétale pure, soit utiliser des mélanges d'huile végétale et de FOD dans des brûleurs non

²⁶ **G. Vaitilingom, Ch. Perilhon, A. Liennard, M. Gandon.** 1998. Development of rape seed oil burners for drying and heating. *Industrial Crops and Products*, Elsevier. Vol. 7, p. 273-279.

²⁷ **T. Daho, O. Sanogo, G. Vaitilingom, J. Koulidiati, P. Girard,** 2007. Caractérisation de diverses huiles végétales sur un brûleur adapté aux huiles végétales. *Revue du CNRST, Sciences et Techniques*, Burkina Faso, vol. 1 n°2, juillet-décembre 2007.

²⁸ **T. Daho, G. Vaitilingom, O. Sanogo,** 2008. Optimization of the combustion of blends of diesel and cottonseed oil in a non-modified boiler. *FUEL* 88 (2009) 1261-1268.

modifiés. Si l'utilisation de mélanges d'huile végétale et de fioul est envisageable, la proportion maximale d'huile végétale admissible sans réchauffage est très limitée (inférieur à 25 %). Au-delà de ces proportions, un réchauffage du mélange, un choix adapté de gicleur et une augmentation de la pression de pulvérisation sont indispensables pour assurer l'allumage de la flamme et une combustion complète. Dans les brûleurs, les caractéristiques du jet sont sensibles à la viscosité du combustible (tailles des gouttelettes, angle et longueur du jet et débit de carburant). Les performances globales ne peuvent être comparées que si les combustibles ont la même viscosité et que si le gicleur de pulvérisation est adapté à la géométrie de la chambre de combustion.

Le premier objectif de cette étude était de vérifier si, à mêmes viscosités et avec un gicleur adapté, les performances globales sont comparables pour tous les mélanges d'huile de coton et de FOD. Le second objectif était de vérifier si une équation de combustion reposant sur un mécanisme chimique global était applicable et pouvait prédire les résultats d'émission, et ainsi pouvaient être utilisée pour optimiser la combustion de ces mélanges dans des brûleurs domestiques de faibles capacités non modifiés.

Les essais ont été effectués au laboratoire de l'UPR (Unité Propre de Recherche) Biomasse-Energie du CIRAD à Montpellier avec la collaboration du Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement (Burkina Faso) de l'Université de Ouagadougou.

Méthodes :

Le brûleur utilisé est un brûleur CUENOD de type NC4 installé sur un banc d'essai comportant une chaudière UNICAL et un échangeur de chaleur constitué de deux aérothermes montés en série et raccordés à la chaudière.

Le choix de ce dispositif (chaudière+brûleur) présente deux intérêts importants : (1) ce système correspond à un usage classique (chauffage domestique), (2) on se place dans des conditions où la température moyenne de la chambre de combustion est relativement faible (transferts thermiques entre les produits de combustion et l'eau de la chaudière), permettant d'évaluer l'influence de la température de la chambre sur la qualité de combustion des huiles. Ceci rejoint nos constats sur les différences de comportement des huiles, selon les conditions de température de la chambre avec les moteurs diesels (injection directe et injection indirecte),

Sept types de mélanges d'huile de coton raffinée et de FOD ainsi que le FOD pur ont été caractérisés sur ce dispositif. La proportion d'huile de coton raffinée dans les différents mélanges varie de 10 à 70%, par pas de 10.

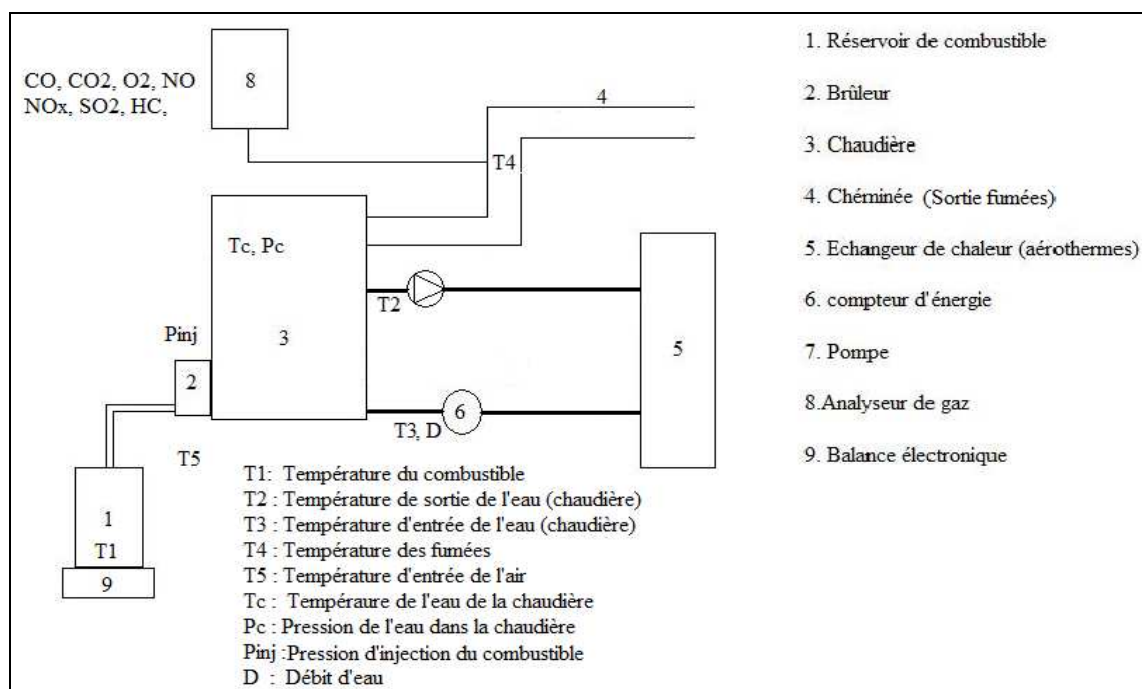


Figure 39 : schéma du dispositif expérimental de mesure sur le brûleur NC4.

Un soin particulier a été apporté à la caractérisation des différents mélanges testés.

Pourcentage d'huile de coton dans le fioul (%)	Température du combustible (°C)	Viscosité (mm ² /s)	T _{ambiante} (°C)
0	35	4,03	25-30
10	50	3,62	
20	60	3,70	
30	75	3,60	
40	80	3,70	
50	85	4,00	
60	100	3,90	
70	110	4,10	

Tableau 25 : températures et viscosités correspondantes des différents combustibles.

Paramètre	Méthode/Norme	FOD	Coton raffinée
C (%)		86,89	77,39
H (%)		12,98	11,90
O (%)		0,45	11,10
N (%)		<0,3	<0,30
S (%)		<0,2	0
Formule chimique	Calcul	CH _{1,79}	CH _{1,87} O _{0,11}
Pouvoir comburivore (g.air/g.comb)	Calcul	14,43	12,51
Pouvoir fumigène sec (m ³ gaz/kg.comb)	Calcul	10,49	9,13
PCI (kJ/kg)	ASTM D 240	43741	36000
Masse volumique à 15 °C (kg/m ³)	NF EN ISO 12185	854	929
Viscosité à 40 °C (mm ² /s)	NF EN ISO 3104	3,3	35,7
Phosphore (ppm)	NFT 60 106		0,2
Magnésium (ppm)	NFT 60 106		0,2
Calcium (ppm)	NFT 60 106		2,1
Indice d'acide (mgKOH/g)	ASTM D 664		0,17
sédiments (ppm)	NF EN 12662		23
Teneur en eau (ppm)	NF EN ISO 12937	100	656

Tableau 26 : caractéristiques physico-chimiques du FOD et de l'huile de coton raffinée.

Fatty acids	Composition (% total TFA)
C14:0	0.8
C16:0	25.7
C16:1	0.5
C18:0	2.4
C18:1	18.2
C18:2	51.3
C18:3	0.3
C20:0	0.2

Tableau 27 : composition en acides gras de l'huile de coton raffinée utilisée.

Résultats :

Au delà de 30% d'huile de coton incorporée dans le FOD, l'inflammation du combustible dans le brûleur Cuenod NC4 devient très difficile pour des réglages et conditions de fonctionnement standard (au FOD). Le réchauffage et l'augmentation de la pression de pulvérisation sont alors indispensables.

Mais le débit massique du combustible augmente avec le pourcentage d'huile dans le mélange et croît proportionnellement à la racine carrée de la pression de pulvérisation. En effet, les volumes de combustible pulvérisé à une pression donnée sont sensiblement égaux pour les différents combustibles, et l'augmentation de la masse volumique avec le pourcentage d'huile dans le mélange, entraîne une augmentation de la masse pulvérisée. Cette augmentation compense en retour le déficit énergétique lié à la diminution du PCI lorsque le pourcentage d'huile augmente. Ainsi, les puissances thermiques obtenues avec les différents combustibles sont restées du même ordre de grandeur.

Avec des viscosités identiques et des quantités d'énergie introduites équivalentes, nous pouvons donc comparer les émissions en fonction des différences de compositions chimiques des mélanges, et non en fonction « de l'inadaptation » des équipements (système de pulvérisation et géométrie de la chambre de combustion).

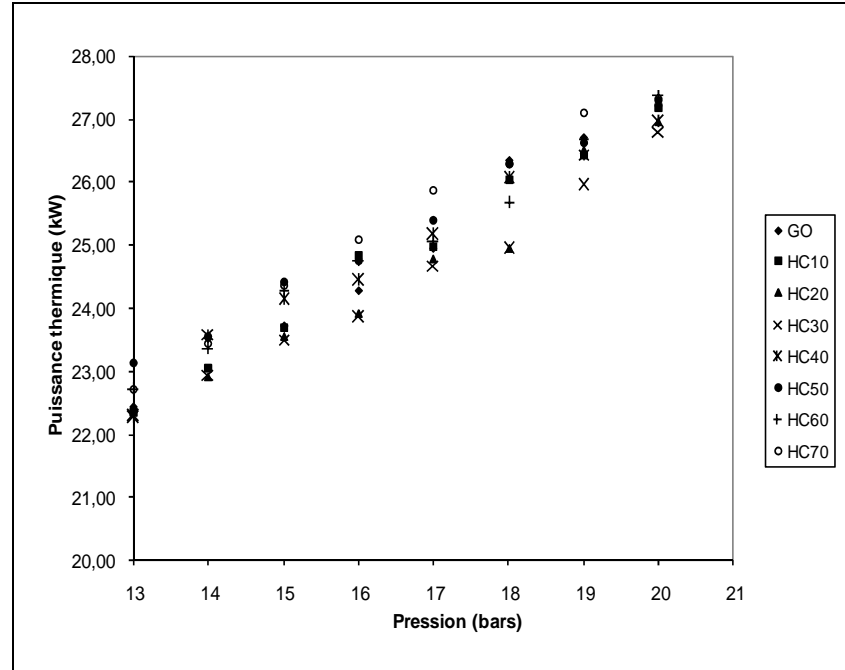
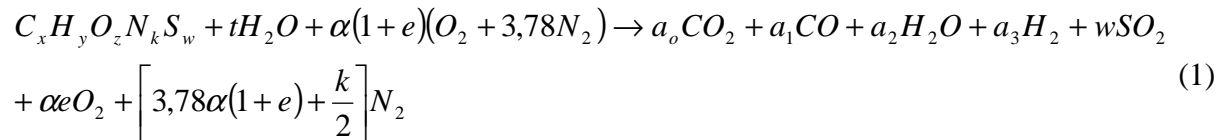


Figure 40 : puissance thermique en fonction de la pression de pulvérisation.

Nous connaissons la composition chimique de chaque mélange sous la forme $C_xH_yO_zS_wN_k$. Ceci nous a permis, en première approximation, de déterminer les teneurs dans les fumées de certains gaz incondensables, en utilisant la formule générale de l'équation de combustion.



Avec $a_o + a_1 = x$; $y + 2t = 2a_2 + 2a_3$; $y/2 + t = a_2 + a_3$

On considère que a_1 et a_3 sont très petits devant a_o et a_2 . Cette hypothèse tient en partie des conditions de combustion en mélange pauvre.

On considère pour la suite, la combustion de 100 g de combustible. Ainsi, on a :

$x = m_C/M_C$; $y = m_H/M_H$; $z = m_O/M_O$; $w = m_S/M_S$; $k = m_N/M_N$;

Avec m_i , la masse de l'élément i ($i = C, H, O, N, S$) dans 100 g (m_i étant donnée par la composition centésimale) du combustible et M_i , sa masse molaire.

Pour un mélange (m) donné, le nombre de mole de chaque élément (i) est donné par l'équation (2).

$$n_{im} = \sum n_{ik} p_k \quad (2)$$

Avec :

n_{im} , le nombre de mole de l'élément (i) dans le mélange (m)

n_{ik} , le nombre de mole de l'élément (i) dans 100 g du combustible (k)

p_k , la proportion massique du combustible (k) dans le mélange (m)

Le nombre de moles n_{pj} d'un produit (p_j) provenant de la combustion d'un mélange de 100g de combustible étant connu, on obtient la composition volumique des produits de combustion :

$$\% \text{ vol } (p_j) = \frac{n_{p_j}}{\sum_j n_{pj}} * 100 \quad (3)$$

Avec p_j le $j^{\text{ème}}$ produit de combustion.

- Les émissions de CO obtenues avec les différents combustibles montrent un comportement global similaire. Ces émissions deviennent pratiquement constantes à partir de 19 bars, avec un resserrement à 20 bars. L'effet de l'augmentation de la pression est très déterminant dans la réduction du CO. En effet, l'augmentation de la pression modifie les caractéristiques du jet (atomisation, angle du jet) et entraîne une augmentation de la température de la chambre de combustion (liée à l'augmentation de la puissance thermique). Cela contribue à une meilleure vaporisation et une diminution des richesses locales. En deçà de 19 bars, malgré des viscosités sensiblement proches, les combustibles contenant une plus forte proportion d'huile de coton semblent conduire à des taux de CO plus élevés. Cela est dû au caractère chimique particulier de chaque combustible. Ces disparités de qualité de combustion tendent à disparaître pour des pressions élevées, où les conditions de températures sont suffisantes quel que soit le combustible pour une bonne combustion. **On observe une certaine uniformité dans le comportement des différents combustibles, en particulier au point de fonctionnement correspondant à la richesse de 0,86 et à la pression de 20 bars.**
- **Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux :**
La valeur de l'oxygène résiduel théorique, ainsi que les valeurs théoriques d'émissions de CO₂, SO₂ ont été déterminées sur la base de la composition chimique des mélanges et de l'équation théorique. Les valeurs théoriques sont comparées aux valeurs expérimentales mesurées avec l'analyseur de gaz. Les résultats obtenus avec le mélange HC30 sont présentés dans les figures 41 à 43. Quant au CO et aux NO_x, le modèle chimique global considéré ne permet pas d'obtenir une approximation théorique de leurs niveaux d'émissions. Il faudrait pour cela recourir à un modèle cinétique détaillé.

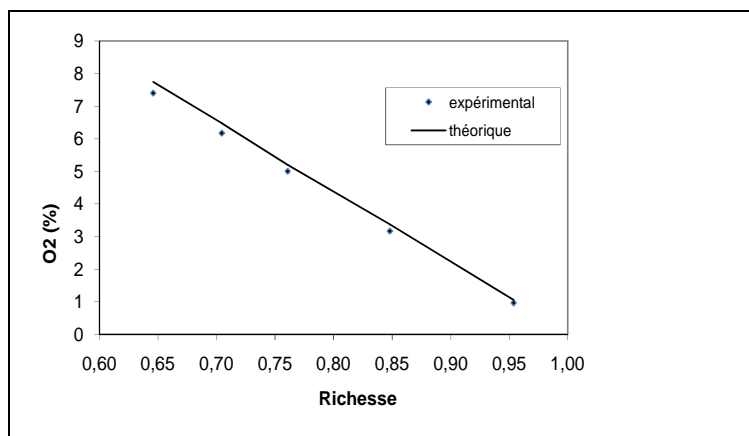


Figure 41 : Oxygène résiduel théorique et expérimental en fonction de la richesse (HC30).

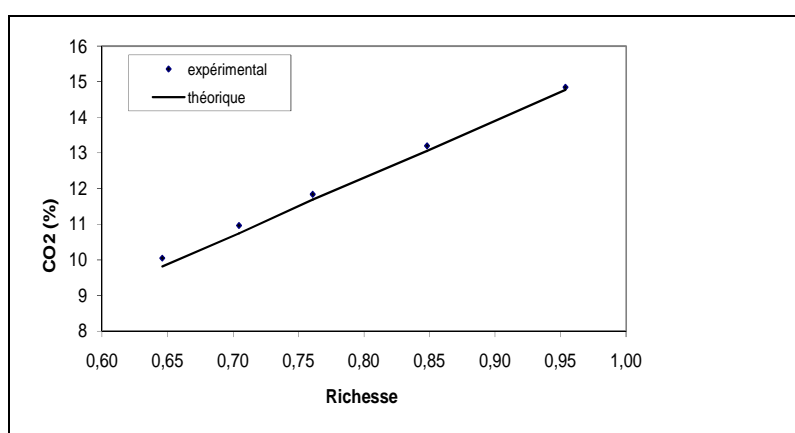


Figure 42 : CO2 théorique et expérimental en fonction de la richesse (HC30).

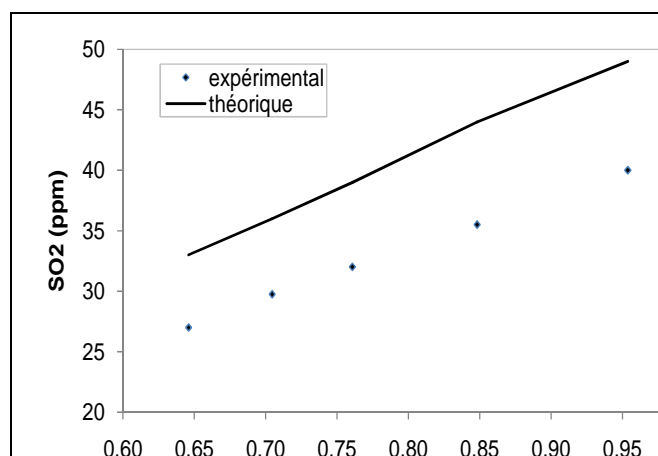


Figure 43 : SO2 théorique et expérimental en fonction de la richesse (HC30).

Pour le SO_2 , les écarts entre les résultats théoriques et expérimentaux sont de l'ordre de 18%. Ces écarts restent acceptables au regard de l'incertitude relative sur la détermination du SO_2 qui est de l'ordre de 15%. Toutefois, des valeurs plus faibles du SO_2 mesuré pourraient être dues à une surestimation du SO_2 théorique qui ne prend pas en compte une éventuelle formation du SO_3 suivie de la formation d'acide sulfurique

Conclusions :

Cette étude a révélé les potentialités que présentent les mélanges d'huile de coton et de FOD en tant que combustible pour les brûleurs non modifiés dans des applications de type « circuits courts ».

Les résultats obtenus en termes de performances globales et d'émissions sont comparables à ceux obtenus avec le FOD pour des mélanges contenant 10 à 70% d'huile de coton. Toutefois, les caractéristiques physiques et chimiques différentes des mélanges, confèrent à chaque mélange le statut d'un combustible particulier qui nécessite des réglages spécifiques du brûleur (excès d'air, pression de pulvérisation, température de réchauffage etc.).

On observe une certaine uniformité dans le comportement des différents combustibles, en particulier au point de fonctionnement correspondant à la richesse de 0,86 et à la pression de 20 bars où les émissions de CO, NO_x et CO₂ sont similaires.

Les résultats expérimentaux d'émissions, obtenus pour des réglages adaptés à chaque mélange, sont comparés aux résultats théoriques obtenus grâce à l'équation de combustion basée sur un mécanisme chimique global. Les résultats montrent un bon accord entre les résultats théoriques et expérimentaux.

Ces mélanges obéissent ainsi aux lois de la combustion, au même titre que le FOD.

Ce comportement rejoint celui observé sur des moteurs diesels pour les lois de dégagement de chaleur.

3.2.3.2 Caractérisation de diverses huiles végétales sur un brûleur adapté aux huiles végétales.

Cette partie fait l'objet d'une publication en cours de révision²⁹.

Une approche similaire à la précédente a été effectuée sur un modèle de brûleur adapté aux huiles végétales. Ce type de brûleur a été développé grâce à un projet de recherche et développement que j'ai mené avec le constructeur RIELLO, premier fabricant mondial de brûleur fioul (voir chapitre suivant).

Nous nous sommes, puisque travaillant avec un brûleur adapté, attachés à l'analyse des produits de combustion liés aux caractéristiques des huiles utilisées : compositions chimiques, influence du raffinage, caractéristiques physiques : étude de la qualité du jet produit.

Introduction

Les huiles végétales se distinguent entre elles et se distinguent aussi du gazole, ou du fioul domestique (FOD) par leur nature physique et chimique. En particulier, la composition en acides gras, la viscosité, la volatilité qui sont des facteurs déterminants dans les différences de comportement de celles-ci. Dans cette étude, une caractérisation

²⁹ T. Daho, G. Vaitilingom, O. Sanogo, S.K. Ouiminga. Combustion of vegetable oils under optimized conditions of atomization and granulometry in a modified fuel oil burner. En cours de révision auprès de FUEL . Réf de l'article JFUE-D-11-00771

physico-chimique de différentes huiles végétales est effectuée dans un premier temps : nature des acides gras, teneur en phospholipides, viscosité, composition chimique élémentaire, masse volumique, point éclair, pouvoir calorifique inférieur (PCI), tension superficielle, indice d'acide, teneurs en magnésium, en calcium, en sédiments, et en eau. Trois types d'huile de coton (brute, dégomée, raffinée) et l'huile de colza sont caractérisés. Le choix des trois types d'huile de coton repose sur la recherche d'un compromis entre le coût de production du combustible et sa qualité en tant que combustible. En second lieu, ces différentes huiles végétales ainsi que le FOD sont utilisés comme combustibles dans un brûleur adapté à l'huile végétale. La consommation du combustible ainsi que les émissions (CO , O_2 , CO_2 , NO , NO_x , SO_2 , et composés organiques) sont évaluées au point de fonctionnement optimum déterminé au préalable.

Méthode

La figure 44 présente le schéma du dispositif expérimental utilisé. Il comporte un brûleur adapté à l'huile végétale, une chambre de combustion et deux dispositifs d'analyse des produits de combustion.

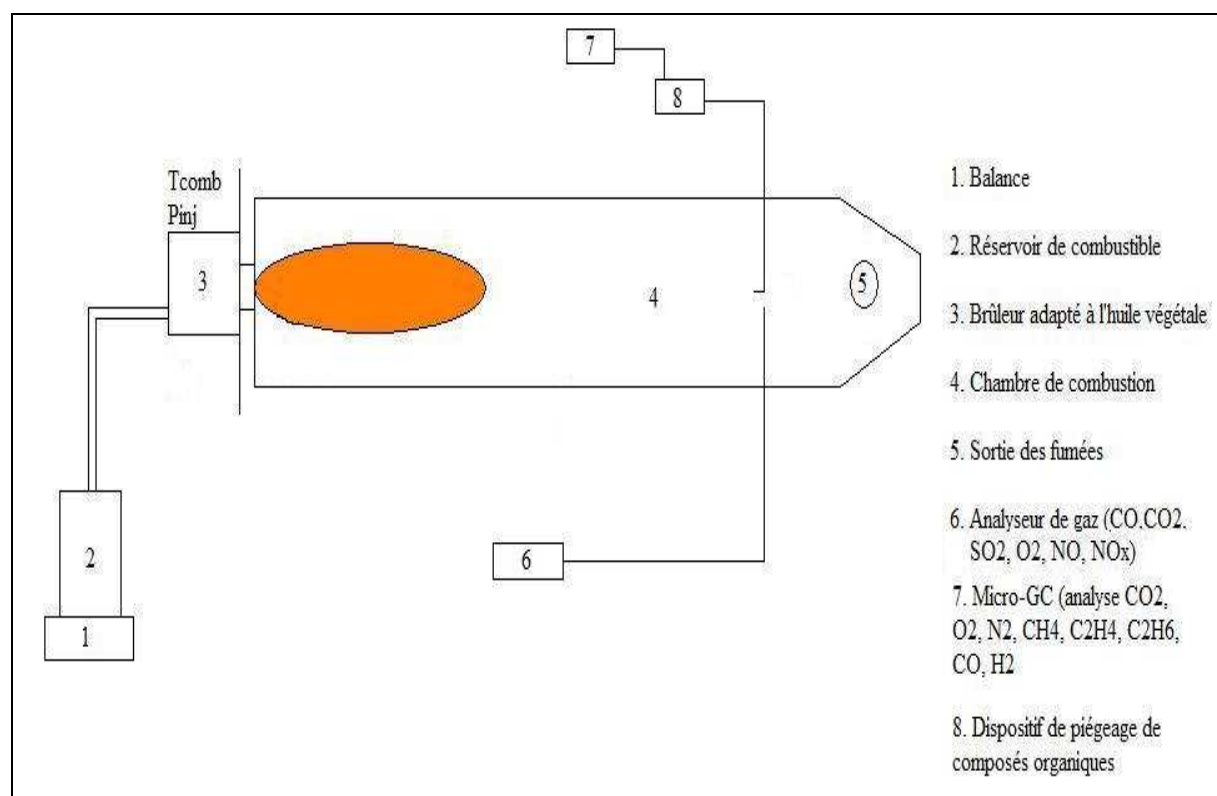


Figure 44 : schéma du dispositif expérimental sur le brûleur N10.

Le brûleur utilisé est un brûleur Riello de type N10 comportant un système de préchauffage du combustible. L'huile peut être préchauffée à des températures comprises entre 50 et 200°C.

La combustion se produit ensuite dans la chambre de combustion qui est une enceinte cylindrique horizontale en acier. Une telle chambre, destinée à une utilisation des produits de combustion pour un séchage direct de produits alimentaires ou non, a l'intérêt d'avoir des parois chaudes (températures supérieures à 500 °C).



Photo 6 : le brûleur N10 et la chambre de combustion.

Le dispositif d'analyse des produits de combustion comprend deux systèmes : un analyseur de gaz Quintox KM9106, équipé de cellules électrochimiques. Il permet de mesurer les teneurs en O_2 , NO , NO_x , CO , SO_2 dans les fumées sèches. Le taux de CO_2 est calculé par l'analyseur, en fonction des caractéristiques du combustible et de l'oxygène résiduel mesuré dans les fumées. Les fumées humides passent à travers une canne puis dans un conduit réchauffé à $115\text{ }^{\circ}C$ pour éviter la condensation et la dissolution de certains gaz (SO_2 , NO_x). Les gaz passent ensuite dans un conditionneur de gaz de combustion (KM9008) permettant d'avoir à l'entrée de l'analyseur, des gaz secs.

Le deuxième dispositif d'analyse des produits de combustion comprend un bain de piégeage des composés organiques dans les fumées et un micro chromatographe (micro-GC). Les gaz prélevés barbotent dans une série de flacons (qui plongent dans le bain réfrigérant) contenant de l'isopropanol, puis passent dans la micro GC pour l'analyse des gaz incondensables (H_2 , O_2 , N_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , CO_2 , CO). La détection et la quantification de ces gaz s'effectuent par spectrométrie de masse. Les composés organiques dissous dans l'isopropanol sont analysés, à posteriori, grâce un chromatographe Agilent 6890 et un spectromètre de masse Agilent 5975

Les points de fonctionnement du brûleur sont définis par la pression de pulvérisation et le rapport air primaire/ air secondaire. Les différents combustibles sont utilisés à la pression constante de 28 bars, suivant différents rapports air primaire/ air secondaire, afin de déterminer dans un premier temps un point de fonctionnement optimum. Ce point correspond à une richesse de 0,55.

A ce point de fonctionnement, une analyse complète (gaz incondensables et composés organiques condensables) des produits de combustion est effectuée ; les gaz sont prélevés juste avant la sortie des fumées. Par ailleurs, l'influence du préchauffage de l'huile sur sa qualité de combustion est étudiée.

Les combustibles utilisés sont trois types d'huiles de coton du Burkina Faso (brute, dégommée et raffinée), l'huile de colza et le fioul oil domestique (FOD).

Résultats

Acides gras	Nom de l'acide	Huiles			
		Coton brut	Coton dégommé	Coton raffiné	Colza brute
14:0	Myristique	0,5	0,8	0,8	0,0
16:0	Palmitique	26,4	26,0	25,7	4,6
16:1	Palmitoléique	0,1	0,6	0,5	-
18:0	Stéarique	2,5	2,4	2,4	1,7
18:1	Oléique	18,6	18,2	18,2	59,1
18:2	Linoléique	52,0	51,5	51,3	25,8
18:3	Linolénique	0,1	0,2	0,3	6,9
20:0	Arachidique	-	0,3	0,2	0,5
20:1	Euricique	-	-	-	0,9

Tableau 28 : Composition en acides gras totaux des huiles utilisées (% pondéral)

Les résultats montrent les particularités des huiles végétales : les différences entre l'huile de colza et les huiles de coton, ainsi que les différences entre les huiles végétales et le FOD. En particulier, la composition en acides gras, la teneur en phospholipides, le PCI, la viscosité, la tension superficielle. La teneur élevée en phospholipides de l'huile brute de coton pourrait être préjudiciable à l'utilisation de celle-ci en termes d'encrassement ou de colmatage des filtres. La plus forte viscosité des huiles et leur plus forte tension superficielle justifient le préchauffage de celles-ci à des températures supérieures à 120 °C et une augmentation de la pression de pulvérisation.

Caractéristique	Combustible					Méthode
	Coton brut	Coton dégommé	Coton raffiné	Colza brut	FOD	
C (%)	77,90	76,71	77,39	77,73	86,89	Combustion
H (%)	11,62	11,84	11,90	11,92	12,98	Combustion
O (%)	11,46	11,47	11,10	10,76	0,45	Pyrolyse
N (%)	<0,10	<0,30	<0,30	<0,10	<0,3	Combustion
S (%)	0	0	0	0	<0,20	NFT 60 106
Viscosité à 40 °C (cSt)	37,0	34,0	35,7	35,7	3,3	NF EN ISO 3104
Teneur en eau (ppm)	756	1156	656	599	100	NF EN ISO 12937
Indice d'acide (mgKOH/g)	6,29	0,18	0,17	1,03	-	ASTM D 664
Masse volumique à 15 °C (kg/m ³)	929	926	929	920	854	NF EN ISO 12185
Sédiments (ppm)	28	33	23	38	-	NF EN 12662
Phosphore (ppm)	203	0,5	0,2	1,6	-	NFT 60 106
Magnésium (ppm)	70,3	0,3	0,2	0,4	-	NFT 60 106
Calcium (ppm)	29,8	2,2	2,1	3,7	-	NFT 60 106
PCI (kJ/kg)	34500	36400	36000	37400 ^a	43700	ASTM D 240
Tension superficielle à 25°C (mN/m)	31,5	32,4	32,4	32,2	28,6	NF EN 14 370
Point éclair (°C)	240,5	>250	229,5	>200°C	62,5	NF EN ISO 2719

Tableau 29 : caractéristiques physico-chimiques des différents combustibles.

Caractéristiques de démarrage

L'étude de l'influence de la température de préchauffage du combustible donne pour des températures comprises entre 65 et 80°C, un allumage difficile de la flamme suivi d'une extinction de celle-ci. Entre 85 et 115°C, on observe un allumage plus aisé de la flamme sans extinction de celle-ci. Cependant, on observe un phénomène d'égouttage du combustible et une flamme se développant sur toute la longueur de la chambre de combustion. En effet, pour des températures de préchauffage voisines de 85°C, le jet de combustible se situe à la limite de la zone de seconde interaction aérodynamique au sens de Reitz [32], conduisant à un spray incomplet. Ce spray est caractérisé par « une longueur de rupture » importante (forte pénétration) et un angle faible. Par ailleurs, l'atomisation ne commence qu'au delà d'une certaine distance de l'orifice du gicleur. Au-

delà de 115°C, les phénomènes d'égouttage disparaissent et la longueur de la flamme diminue.

Détermination des conditions d'atomisation et de granulométrie adaptée.

Pour vérifier théoriquement que les modifications apportées au brûleur de type N10 fournissent de bonnes conditions d'atomisation et une granulométrie adéquate, la démarche adoptée a été basée :

- sur le mécanisme de désintégration du jet et la classification des différents régimes des jets et leurs critères de transition établis par Reitz [32] et Hiroyasu [37]
- sur la détermination du diamètre moyen de Sauter D_{32} en utilisant la corrélation de Elktob et al. (1982) [38] donnée par l'équation (1).

Les nombres de Reynolds (Re_j) et de Ohnesorge (Oh_j) du jet, définis par les équations (2) et (3) permettent de caractériser en première approximation, le régime de désintégration du jet de carburant et de caractériser les transitions entre les différents régimes.

$$\bar{D}_{32} = 6156 \cdot v_{fl}^{0.385} \cdot (\rho_{fl} \sigma_{fl})^{0.737} \cdot \Delta P^{-0.54} \cdot \rho_a^{0.06} \quad (1)$$

$$Re_j = \frac{\rho_{fl} \cdot v_j \cdot d_{tr}}{\mu_{fl}} \quad (2)$$

$$Oh_j = \frac{\mu_{fl}}{\sqrt{\rho_{fl} \cdot \sigma_{fl} \cdot d_{tr}}} \quad (3)$$

v_j , ΔP , d_{tr} , ρ_{fl} , μ_{fl} , σ_{fl} désignent respectivement la vitesse du jet, la différence de pression de pulvérisation et celle dans la chambre de combustion, le diamètre de l'orifice du gicleur, la masse volumique, la viscosité dynamique et la tension superficielle du fluide (huile de coton ou FOD).

Ici, il s'agit de l'atomisation primaire, laquelle dépend en grande partie des caractéristiques physiques et chimiques du carburant (viscosité, tension superficielle et masse volumique du combustible). Il en est de même pour le diamètre moyen de Sauter. La classification des différents régimes de désintégration d'un jet et les critères de transition entre ces régimes sont donnés par les figures 45 et 46.

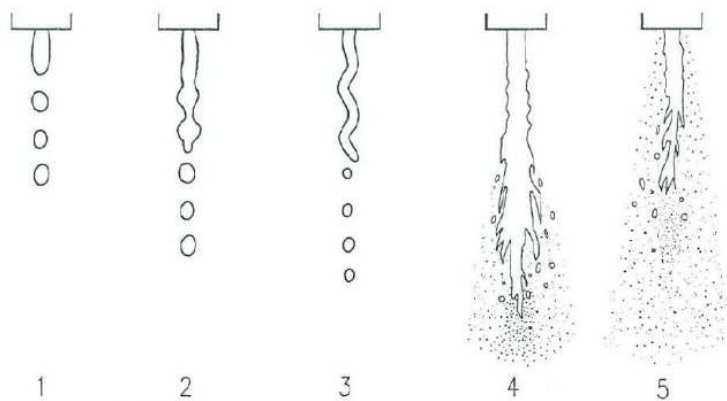


Figure 45 : Régime de désintégration d'un jet issu d'un orifice circulaire (HIROYASU [37]).

Les cinq régimes désignent respectivement :

- (1) : le régime de goutte à goutte
- (2) : le régime de Rayleigh (**RaM**) : (3) : le régime de première interaction aérodynamique -First-wind-Induced (**FWI**) regime.
- (4) : le régime de seconde interaction aérodynamique ou régime de « spray » incomplet (Second-Wind-Induced (**SWI**) regime) : L'atomisation ne commence qu'à une certaine distance (L_c) de la sortie du jet, qui décroît à vitesse d'éjection croissante. L'atomisation commence à la périphérie du jet tandis qu'au centre, il subsiste un noyau qui ne s'atomise qu'à une certaine distance (L_b) appelée longueur de rupture
- (5) : le régime d'**atomisation** ou régime de « spray » complet : l'atomisation commence dès la sortie du jet ($L_c = 0$). Un noyau liquide subsiste au centre au delà duquel se trouve la zone de développement du « spray » et la zone de « spray » développé.

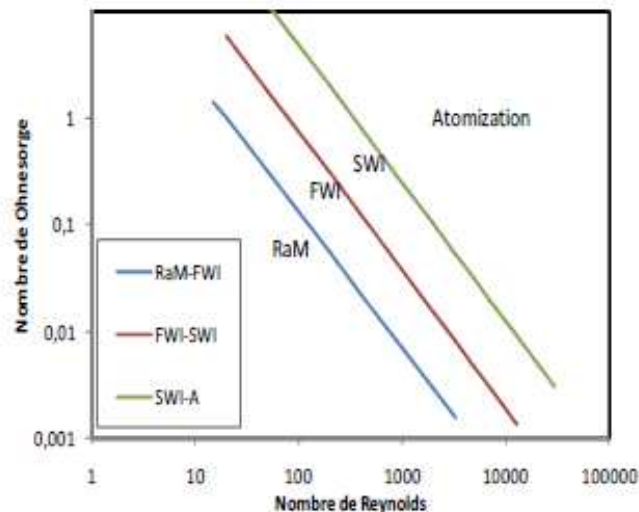


Figure 46 : Classification des différents régimes de désintégration du jet et critères de transition (LEFEBVRE [39]).

Nous avons comparé l'huile de coton raffinée et le FOD, leurs caractéristiques physico-chimiques sont indiquées dans le tableau 29. Les caractéristiques du jet à différentes températures sont données dans le tableau 30. Les conditions d'atomisation de l'huile de coton pour différentes températures de l'huile et pour le point de fonctionnement défini préalablement sur le brûleur N10 sont présentées sur la figure 47.

Température (°C)	Viscosité (mm ² /s)	Tension superficielle (N/m)	Nombre de Reynolds	Nombre de Ohnesorge
85	10,1	0,0290	2521	0,148
95	8,45	0,0284	2767	0,125
105	7,2	0,0278	3089	0,107
115	6,3	0,0272	3356	0,094
125	5,75	0,0267	3561	0,087
150	4,8	0,0252	4193	0,074

Tableau 30 : caractéristiques du jet d'huile de coton dans le brûleur N10.

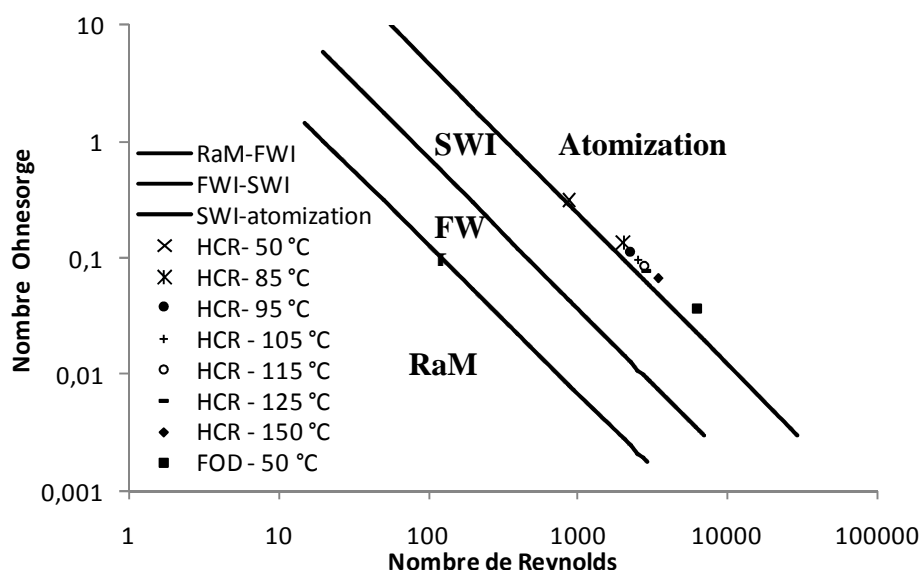


Figure 47 : Conditions d'atomisation sur le brûleur modifié N10.

La figure 47 indique que le réchauffage de l'huile de coton raffinée (HCR), couplé à une forte pression de pulvérisation conduisent à un spray complet pour la plupart des températures de réchauffage. Seule la température de 50 °C conduit à un régime proche de la zone de transition entre les régimes de « *spray* » complet et de « *spray* » incomplet. Les conditions d'atomisation obtenues avec les conditions définies pour l'huile (température, pression) sont comparables à celles du FOD. La pression relativement élevée et l'augmentation de la température de l'huile conduisent à une vitesse de jet relativement élevée, une réduction de la viscosité, de la masse volumique et de la tension superficielle de l'huile. Cela s'effectue dans un rapport tel que la réduction du nombre d'Ohnesorge et l'augmentation du nombre de Reynolds permettent une amélioration des conditions d'atomisation du jet. L'utilisation des carburants visqueux, comme c'est le cas des huiles végétales, dans ce type de brûleur pour des conditions spécifiques permet donc d'obtenir de bonnes conditions d'atomisation.

Sur les brûleurs, la granulométrie doit être comprise entre 50 et 100 μm avec une dispersion telle, que les gouttes de diamètre élevé (200 à 300 μm) constituent une faible fraction de la masse du jet [40], [41].

Tous les combustibles étant utilisés à une même pression de pulvérisation, avec une différence de pression ΔP de l'ordre de 27 bars, les résultats indiquent que le réchauffage de l'huile à une température d'au moins 125 °C est indispensable pour obtenir des diamètres moyens de Sauter inférieurs ou égaux à 100 μm (figure 48).

Ainsi, ces résultats permettent de définir une température de préchauffage minimale de l'huile de coton (125°C) pour obtenir, à la fois un spray complet et une granulométrie adaptée sur ce type de brûleur.

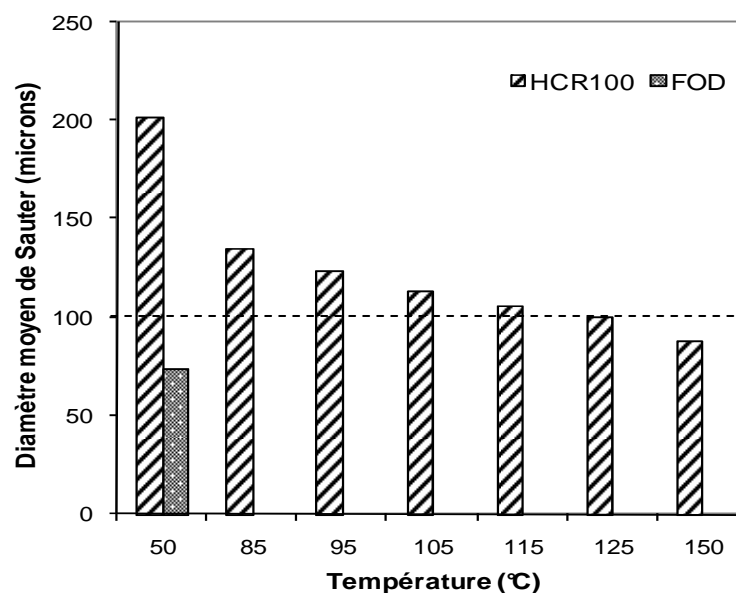


Figure 48 : Diamètre moyen de Sauter du FOD et de l'huile de coton en fonction de la température du combustible

Consommation du combustible

Les tableaux qui suivent donnent respectivement la consommation d'huile de coton raffinée selon la température de préchauffage et la consommation des différents combustibles utilisés à la température de 125°C.

Température combustible (°C)	Masse volumique (kg/m ³)	Consommation (kg/h)
85	872	8,79
95	866	8,01
105	859	7,56
115	852	7,13
125	846	6,85
150	829	6,60

Tableau 31 : consommation d'huile de coton raffinée à différentes températures.

La consommation d'huile de coton raffinée décroît avec l'augmentation de la température de préchauffage. Cette diminution de la consommation est en partie liée à la diminution de la masse volumique avec l'augmentation de la température. Les pompes étant volumétriques, les volumes pulvérisés aux différentes températures pour un même point de fonctionnement, sont sensiblement égaux. La diminution de la masse volumique avec la température conduit à la réduction de la masse pulvérisée. Cependant, la diminution de la consommation n'est pas linéaire, contrairement à celle de la masse volumique.

A 125°C	Coton brut	Coton dégommé	Coton raffiné	colza brut	FOD
Consommation (kg/h)	6,83	6,74	6,85	6,77	5,80

Consommations des différents combustibles utilisés

Les consommations des différentes huiles sont très comparables. Elles restent supérieures à celle du FOD. En effet, les masses volumiques voisines des différentes huiles conduisent à des masses de combustibles pulvérisés très voisines pour des

volumes identiques. La masse de FOD pulvérisé reste ainsi inférieure à celle de l'huile végétale compte tenu de sa masse volumique plus faible.

Emissions polluantes

L'analyse des produits de combustions est l'un des aspects importants de cette étude. Elle présente deux enjeux : premièrement, la qualité de la combustion de l'huile de coton dans ce type de dispositif (brûleur adapté, et parois de chambre chaudes), et son impact sur l'environnement reposent sur la nature et les ordres de grandeurs des polluants dans les produits de combustion. Deuxièmement, le dispositif utilisé dans cette étude pourrait être couplé à un système de séchage direct de produits alimentaires ou non, qui sont soumis à des normes de qualité. Cela requiert une certaine « qualité » des produits de combustion.

Toutes les huiles présentent, pour l'ensemble des gaz mesurés, des teneurs très comparables entre elles et avec celles enregistrées pour le FOD. Les résultats sont conformes à ceux que j'avais obtenus lors d'une étude antérieure avec de l'huile de colza. Les émissions de CO sont de l'ordre de grandeur des incertitudes, de sorte que l'on ne peut pas dégager de différence entre les huiles et le FOD en termes d'émissions de CO. En effet, les conditions de température pour l'ensemble des huiles et le FOD sont suffisantes pour permettre une oxydation quasi complète du CO. Les températures des fumées au point de prélèvement de celles-ci sont de l'ordre de 700 °C. Contrairement à une chambre de combustion installée sur une chaudière, les transferts de chaleur par convection vers l'extérieur de la chambre sont considérablement réduits. De ce fait, l'influence des phénomènes de rayonnement sur la combustion et la température moyenne de la chambre peuvent être importants. De tels phénomènes, s'ils se produisaient, pourraient être favorables à la vaporisation et à la combustion des huiles végétales. Des résultats précédents, obtenus sur un brûleur Cuenod à FOD, montrent que les huiles végétales tendent vers un comportement unique et aussi vers celui du FOD pour des conditions de température suffisantes (puissance thermique élevée) même dans un brûleur à fioul non modifié. Ces mêmes observations (comportement uniforme aux fortes températures) ont été observées lors d'essais sur des moteurs, ou lors d'essais d'évaporation de gouttes d'huiles végétales ou leurs esters et le gazole [33].

Ce même comportement uniforme se traduit à travers les résultats d'émissions de NO et de NO_x qui sont également comparables pour les différentes huiles et le FOD.

Les émissions de CO₂ sont sensiblement égales pour les différentes huiles et sont légèrement inférieures à celles du FOD. Cela pourrait être en partie dû au rapport H/C plus élevé des huiles végétales par rapport au FOD.

Les émissions de SO₂ sont nulles pour les différentes huiles contrairement au FOD. En effet, les émissions de SO₂ sont proportionnelles à la teneur en soufre du combustible (tableau IIIb).

	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	NO (ppm)	NO _x (ppm)	SO ₂ (ppm)
Coton brut	9,2	8,8	15	74	77	0
Coton dégomme	9,9	8,3	13	85	88	0
Coton raffiné	10,2	8,1	13	84	88	0
Colza brut	9,7	8,3	25	68	71	0
FOD	8,5	9,3	0	75	78	45

Tableau 32 : Emissions de gaz incondensables.

Composés organiques	Concentration (mg/m3 gaz)				
	FOD	Coton Brut	Coton dégommé	Coton raffiné	Colza brut
Pyridine	<2,33	<2,33	<2,33	<2,33	<2,33
2 -picoline	<2,33	<2,33	<2,33	<2,33	<2,33
p-xylène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
o-xylène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
3-picoline	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
4-picoline	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
2,3-benzofuran	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Indène	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
phénol	0,23	0,18	0,19	0,22	0,19
2-metoxo-phénol. (gaiacol)	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
o-cresol	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Naphthalene	0,50	0,59	0,76	0,71	0,80
p-cresol	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
rn-cresol	0,08	0,06	0,06	<0,02	<0,02
2-metoxo-4-méthyl-phénol	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
2,4-dimethylphénol	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Quinoline	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
2-me-Naphtalene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Isoquinoline	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
3,4 Dimethylphenol	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
1-Methylnaphtalene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Acenaphtylene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Acenaphtene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Fluorene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Alpha-naphtol	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Beta-naphtol	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Phenanthrene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Anthracene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Fluoranthene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Pyrene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Benzo(a)anthracene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Chrysene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Benzo(b)fluoranthene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Benzo(k)fluoranthene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Benzo(a)pyrene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Dibenzo(ah)anthracene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Indeno(123cd)pyrene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23
Benzo(ghi)perylene	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23	<0,23

Tableau 33 : résultats d'émissions de composés organiques condensables.

Parmi ces composés organiques, ceux qui font l'objet d'une attention particulière sont les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) pour leur caractère cancérigène. Cependant, seul le Benzo(a)pyrène fait l'objet d'une norme dans certaines régions (Europe), il est très souvent utilisé comme indicateur de HAP. Les résultats d'émissions

de HAP obtenus au cours de la présente étude sont pour l'ensemble, en dessous du seuil de détection du dispositif de mesure, sauf pour le naphthalène. Ce HAP, plus léger et moins toxique que les HAP lourds, donne, pour l'ensemble des combustibles, des teneurs comparables avec une valeur légèrement plus élevée pour les huiles végétales, l'insaturation favorisant la formation de HAP. Ces émissions de Naphtalène pourraient être dues à une combustion en mélange pauvre (richesse : 0,55). En effet, les émissions de ce composé se produisent de façon non négligeable en milieu pauvre (pour des richesses inférieures à 0,6) [34], [35]. Quant aux autres HAP, seul un dispositif d'analyse dont la limite de détection permet une quantification de ceux-ci, aiderait à évaluer la qualité de combustion en termes d'émissions de HAP. En particulier, la quantification précise d'une grande partie de ces HAP, sous forme particulaire, est indispensable pour autoriser un séchage direct de produits.

Conclusion

- Cette étude a révélé, les possibilités d'utilisation des huiles végétales dans un brûleur adapté à celles-ci, et ayant subi des réglages adéquats.
- Les émissions des différentes huiles sont très proches sont comparables à celle du FOD. Dans des chambres de combustion du type utilisé dans cette étude, où les conditions de température sont favorables à une bonne combustion des huiles végétales, on observe un comportement uniforme. Ces résultats sont conformes à ceux déjà observés dans des brûleurs à fioul non modifiés ou dans des moteurs Diesel, lorsque les conditions de température sont suffisantes pour une bonne combustion.
- Par ailleurs, les résultats sont peu variables quelque soit le traitement subi par l'huile de coton. Au regard de la composition en acides gras, de la viscosité, de la teneur en phosphore, des résultats d'émissions, on peut dire que le dégommeage de l'huile de coton peut suffire à obtenir une bonne qualité de l'huile en tant combustible pour ce type de brûleur. Quant à l'huile brute de colza, le dégommeage ne semble pas nécessaire.
- Pour des applications de séchage direct, ou indirect, une analyse plus fine des émissions de composés organiques (aldéhydes, HAP), en particulier des HAP sous forme particulaire, est nécessaire. Aussi, ces mesures devront s'effectuer dans des conditions simulant un séchage avec une dilution des produits de combustion.

3.2.4 Contribution à l'étude des huiles végétales de Coton et de *Jatropha curcas* comme biocarburant dans les moteurs diesels à injection directe.

Cette étude a fait l'objet d'une publication³⁰

L'huile de jatropha fait l'objet d'une attention particulière dans beaucoup de pays en développement, on l'a vu dans le paragraphe 3.1.7, mais également dans les pays émergents (Brésil, Chine et Inde).

³⁰ S. S. Sidibé, J. Blin, G. Vaitilingom, Y. Azoumah, 2010. Use of crude filtered vegetable oil as a fuel in diesel engines. State of the art: literature review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 2748–2759.

J'avais déjà étudié, dans le cadre d'un programme de recherche européen, les performances globales de l'huile de jatropha dans les moteurs diesels et dans un brûleur³¹. Une recherche plus approfondie a démarré avec l'Université de Ouagadougou qui vise à caractériser l'huile de jatropha en tant que carburant national. La formation à la recherche de chercheurs du Sud fait partie du mandat du Cirad, et c'est dans ce cadre que Sayon Sidibé, faisant suite à Tizane Daho, a entrepris ce travail de thèse sous ma co-direction. Il a obtenu son doctorat en juin 2011³².

Objectif général de la recherche

L'objectif général de la thèse était de contribuer à une meilleure maîtrise de la combustion des huiles végétales dans les moteurs Diesel à combustion interne. Les travaux publiés s'intéressent principalement à la modification des caractéristiques physico-chimiques des huiles végétales pour qu'elles soient proches du diesel (préchauffage, mélange huile/gasoil*, ...) afin qu'elles aient une combustion similaire à ce dernier. Les publications qui résultent de ces travaux de recherche se contredisent souvent notamment en ce qui concerne les conclusions sur les solutions à apporter pour palier aux problèmes d'utilisation des huiles végétales.

* : le terme « gasoil » et non « gazole » sera utilisé ici, car il est d'usage au Burkina Faso.

Les objectifs visés étaient les suivants :

1. Mener une étude sur les adaptations à apporter aux équipements situés en amont de l'injecteur,
2. Analyser les caractéristiques de la combustion (délais d'inflammation, combustion cinétique et combustion diffusante) des huiles végétales fortement réchauffées ou non dans les moteurs à injection directe.

En ce qui concerne la partie adaptations en amont de l'injecteur, plusieurs solutions pour y remédier ont été étudiées :

- préchauffage des huiles végétales afin de diminuer la viscosité,
- mélange des huiles végétales avec le gasoil à différentes teneurs, afin de diminuer la viscosité, mais aussi afin de bénéficier d'une supposée meilleure combustion de l'huile, grâce à celle du gasoil.
- recirculation des gaz d'échappement (EGR) dans le moteur ; afin de bénéficier d'un apport de chaleur à l'admission favorable à l'inflammation et à la combustion.

Les résultats sont ici présentés de façon très résumée, on trouvera les détails dans le mémoire de thèse de Sayon Sidibé (voir note 32).

³¹ **G.Vaitilingom, A. Liennard**, 1997. Various vegetable oils as fuel for Diesel and burners: Jatropha curcas particularities. Biofuels and industrial products from J. curcas. Ed. Technische Universität Graz, Austria.1997. p 98-109

³² **S. Sidibé**, 2011. Contribution à l'étude des huiles de coton et de Jatropha comme biocarburants dans les moteurs diesels à injection directe. Thèse de doctorat, Université de Ouagadougou et Ecole Inter Etats 2IE. Burkina Faso.

Moyens en place :

Les travaux à Ouagadougou ont été effectués sur un moteur diesel de marque LOMBARDINI de type 9LD 561 2/L. C'est un moteur à injection directe, bicylindre, quatre temps, refroidi par air et à aspiration naturelle d'air de combustion. La puissance nominale du moteur est de 8,8 kW à 1500 tr/min. Le moteur entraîne un alternateur électrique de puissance nominale apparente 8KVA soit 6kW. La mise en charge de l'alternateur est réalisée grâce à deux bancs de charge triphasés composés chacun de résistances électriques chauffantes. La charge est réglable de 0 à 6 kW par des pas de 0,2kW.

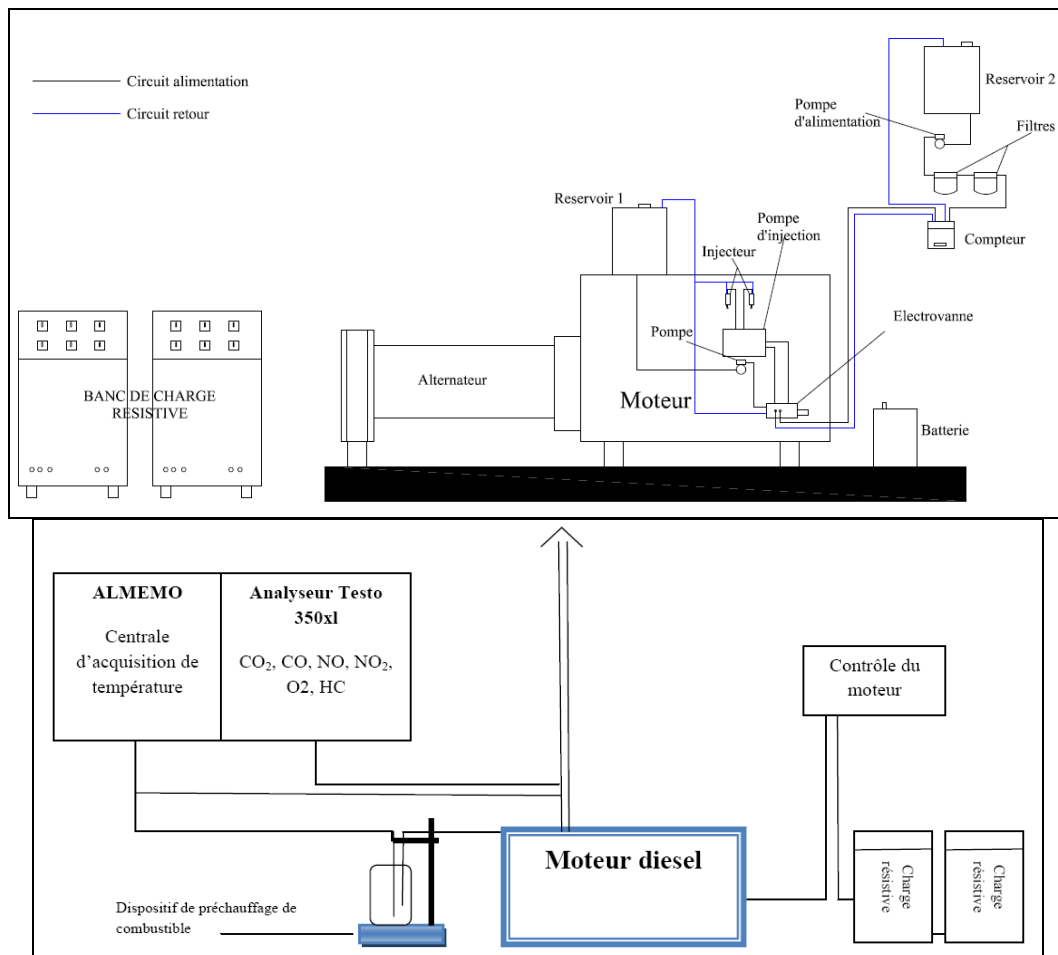


Figure 49 : Schéma de l'installation d'essai au 2IE de Ouagadougou.



Photo 7 : installation d'essai du LBEB, Institut 2IE, Ouagadougou.

Résultats :

Malgré des moyens d'essais modestes, il a été possible de réaliser les mesures et de dégager les premières conclusions de ces travaux entièrement effectués à Ouagadougou au sein du LBEB (Laboratoire Biomasse Energie et Biocarburant) de l'Institut 2IE.



vanne EGR montée sur le moteur



vue d'ensemble du moteur avec le dispositif de la vanne d'EGR

Photo 8 : le dispositif de recirculation des gaz d'échappement du LBEB.

- L'étude du préchauffage de l'huile de Jatropha et de ces mélanges permet de tirer les conclusions suivantes :
- Les performances du moteur diesel sont restées comparables avec une huile préchauffée à 110°C et une huile non préchauffée.

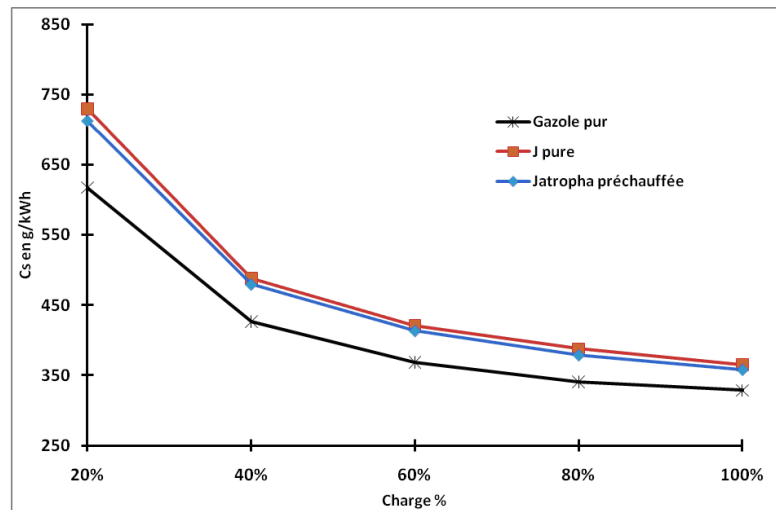


Figure 50 : consommation spécifique en fonction de la charge avec jatropha réchauffé à 110°C et jatropha non réchauffé (Jpure : à temp. ambiante de 35°C).

- Les différences constatées au niveau des résultats d'émissions de gaz polluants du moteur sont plus dues au processus de combustion et à d'autres caractéristiques intrinsèques de l'huile (PCI, densité, indice de cétane) qu'à la viscosité.
- Les résultats des performances et des émissions du moteur avec comme carburant le mélange de 20% d'huile de Jatropha dans le gazole, sont assimilables à ceux du gazole pur.

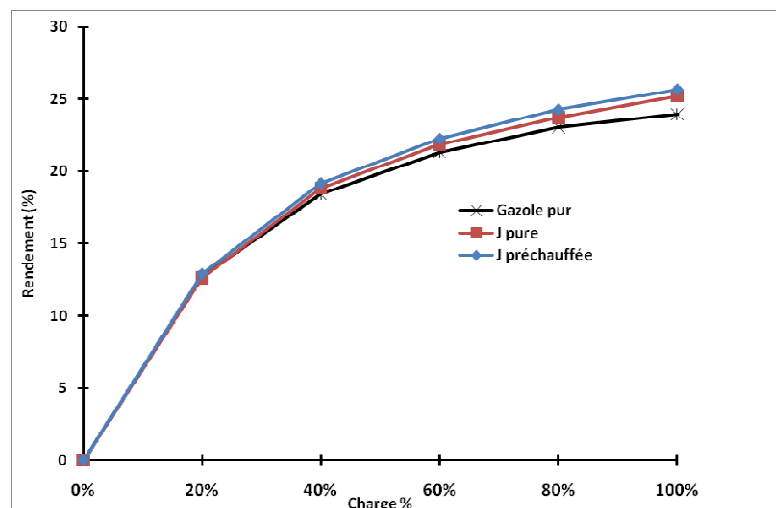


Figure 51 : rendement global effectif en sortie alternateur en fonction de la charge avec jatropha réchauffé à 110°C et jatropha non réchauffé (Jpure : à temp. ambiante de 35°C).

- Le mélange de 75% d'huile de Jatropha dans du gasoil utilisé comme carburant dans le moteur donne les meilleures performances et émissions du moteur, par rapport à l'ensemble des combustibles utilisés.

- Le préchauffage de l'huile de Jatropha et de ces mélanges n'a pas d'influence significative ni sur les performances globales ni sur les émissions à l'échappement, hormis les différences dues à la diminution de PCI entre gasoil et huiles. L'influence est beaucoup plus visible sur les organes d'alimentation du moteur c'est-à-dire les filtres, la pompe d'alimentation, la pompe d'injection et l'injecteur.

➤ Recirculation des gaz d'échappement (EGR) :

Une étude d'optimisation de la recirculation des gaz d'échappement (EGR) du moteur a permis de montrer que le taux optimal de recirculation pour le moteur du banc d'essai était de 20%. Les combustibles utilisés sont l'huile pure de coton* (HVC) et le gasoil. La charge du moteur varie de 0% (ralenti) à 100% (pleine charge) de l'alternateur couplé au moteur (voir figures 52 à 55).

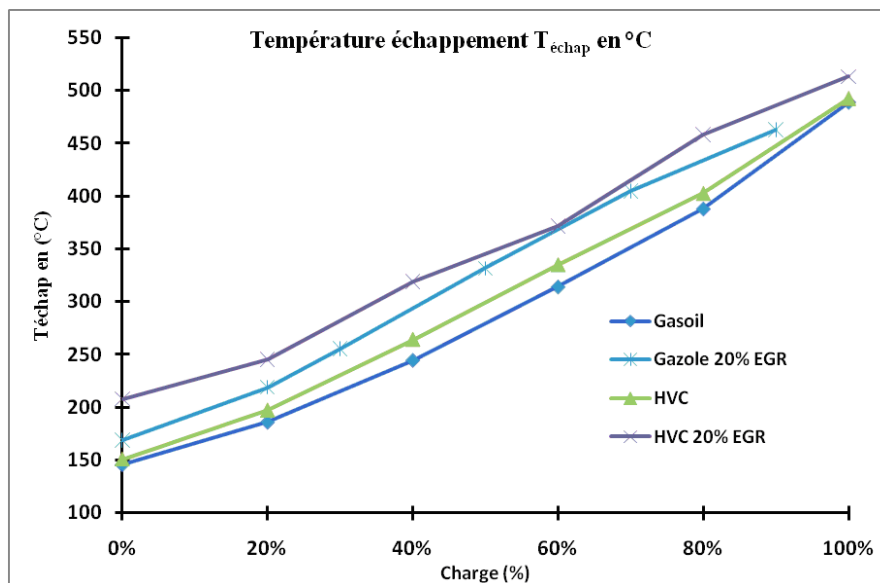


Figure 52 : température des gaz d'échappement en fonction de la charge pour 0 % et 20 % de taux d'EGR.

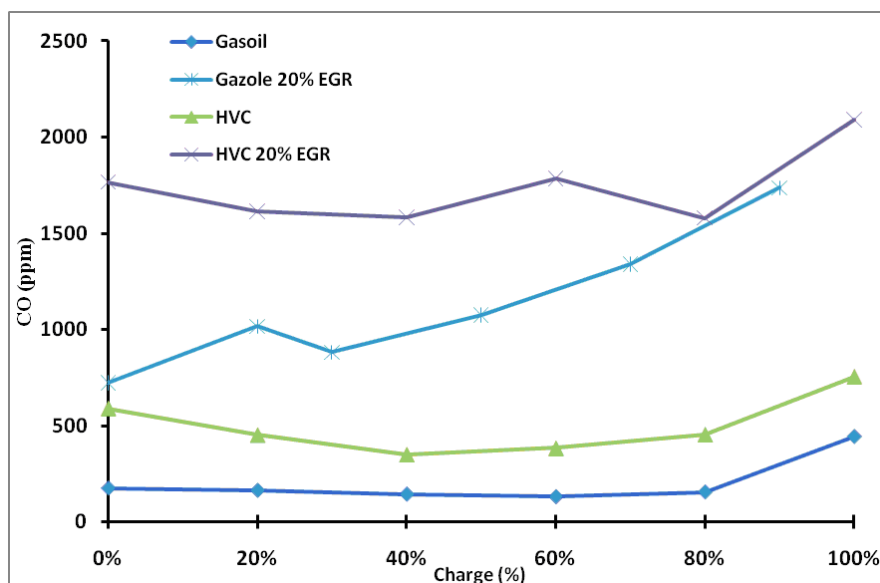


Figure 53 : émissions de CO en fonction de la charge pour 0 % et 20 % de taux d'EGR.

* : l'huile de coton a été choisie à la place de celle de jatropha pour des raisons de pénurie de cette dernière, lors des essais.

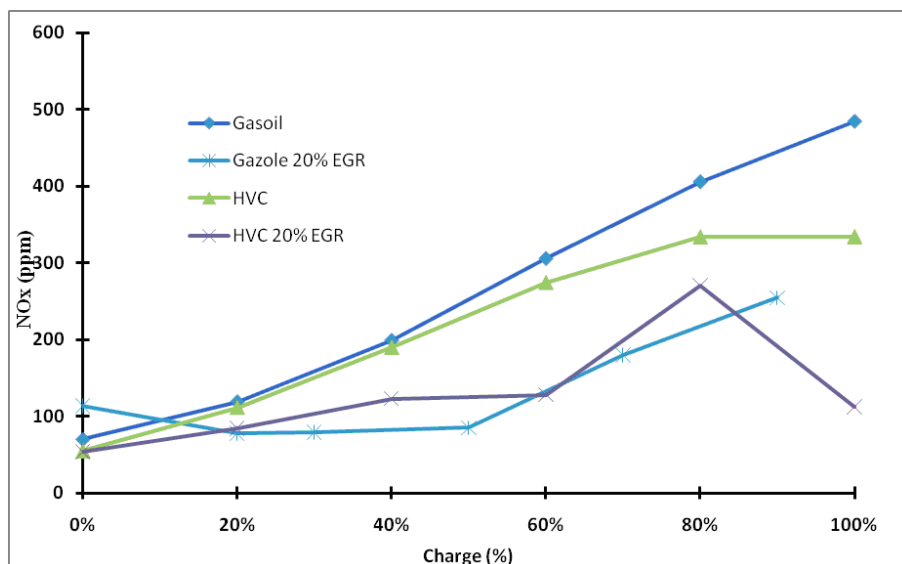


Figure 54 : émissions de NO_x en fonction de la charge pour 0 % et 20 % de taux d'EGR.

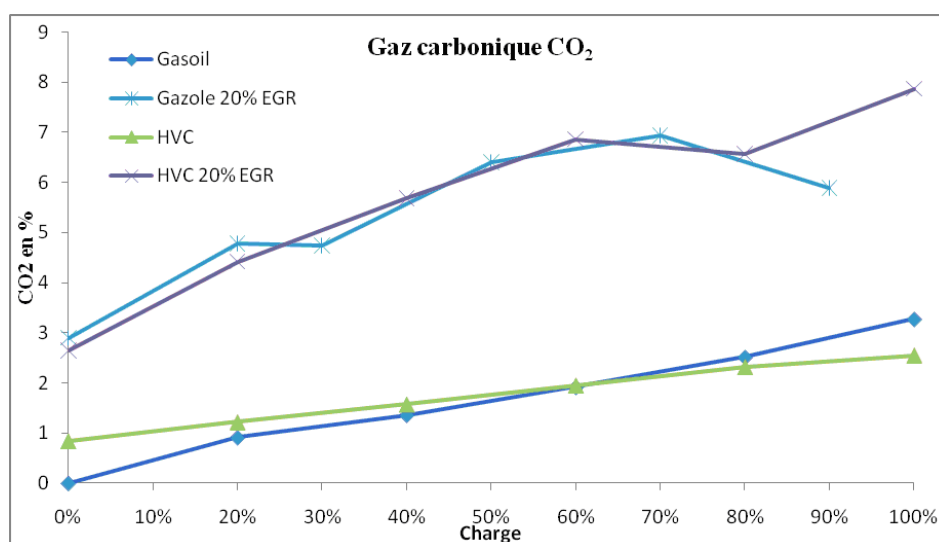


Figure 55 : émissions CO₂ en fonction de la charge pour 0 % et 20 % de taux d'EGR.

- Dans ce moteur, le système de recirculation des gaz d'échappement est optimum, pour un taux d'EGR égal à 20%.
- L'EGR provoque les mêmes effets que ce soit avec du gazoil ou de l'huile de coton :
 - * l'EGR permet de réduire les émissions de NO_x jusqu'à 60%, et la réduction est plus importante pour de fortes charges.
 - * l'EGR entraîne une augmentation du taux de CO,
- Mais l'encrassement du système d'EGR est très rapide avec l'HVC.

En conclusion de cette série de travaux, dans un moteur à injection directe, il n'apparaît pas de différences explicites, en termes de performances globales et d'émissions entre une huile végétale non réchauffée, donc visqueuse (visco. cin. à 37,8°C: 36,8 mm²/s), et la même huile fortement réchauffée à 110°C (visco. cin. : 6.6 mm²/s) de manière à ramener sa viscosité à une valeur proche de celle du gazoil (visco. cin. à 37,8°C: 3,6 mm²/s).

3.2.5 Influence de la taille des gouttelettes de carburant et de la charge sur les performances, les émissions et les dégagements de chaleur dans un moteur alimenté avec de l'huile coton et ses mélanges avec du gazole.

Cette étude fait l'objet d'une soumission auprès de la revue Applied Energy³³.

Introduction :

En fin de compte, ce sont bien la plus faible volatilité et la plus grande viscosité des huiles végétales qui sont les raisons avancées pour expliquer leur tendance à former des dépôts dans les chambres de combustion. C'est sans doute aller un peu vite en conclusions et privilégier ainsi l'influence de la physique sur la chimie.

La « physique » est prépondérante dans les températures dites faibles pour des huiles végétales (où, par exemple, il n'y a pas vaporisation complète, soit en dessous de 440°C). Au-delà de 500°C, on remarque une influence croissante de la température sur les huiles végétales ainsi qu'un lien avec leur composition chimique de base : la « chimie » devient influente.

En effet, on a vu que les conditions thermiques au moment de l'injection sont très influentes sur les délais d'inflammation :

- en évaporation, il faut un peu moins de 200° supplémentaires au milieu ambiant pour qu'une gouttelette d'huile végétale s'évapore aussi vite qu'une gouttelette de fioul.
- une augmentation de 80°C de l'air admis dans un moteur diesel permet aux huiles végétales de présenter la même évolution de délai que le gazole avec un air à l'admission non réchauffé³⁴.

La réduction de la viscosité demeure donc « LA solution » majeure avancée pour éviter la formation de dépôts. Ceci reste à prouver car, on est surpris de ne pas observer de différences dans les performances globales et surtout sur les émissions à l'échappement entre une huile fortement préchauffée et la même huile non préchauffée, et ceci précisément dans des moteurs à injection directe. Globalement, la tentative d'explication consiste à considérer la formation de grosses gouttelettes qui n'auraient pas assez de temps pour se vaporiser et brûler et finiraient par polymériser sur les parois « froides » des chambres de combustion.

Afin de poursuivre notre contribution à une meilleure connaissance du processus de combustion des huiles végétales, nous avons décidé d'approfondir deux aspects peu décrits dans la littérature :

- quelles sont les caractéristiques granulométriques de jets d'huiles végétales ? Dans le cas de mélanges huiles/gazole, existe-t-il un optimum ?

³³ **Daho , G Vaitilingom, S K. Ouiminga, B Piriou, A S. Zongo, J Koulidiati** Influence of engine load and fuel droplet size on performances, emissions and heat release in a CI engine fueled with cottonseed oil and its blends with diesel fuel.

³⁴ Ces deux résultats ont été généralement mal interprétés et bien des « kits de bicarburation » (voir paragraphe 3.3.1) ont proposé des systèmes de passage du gazole à l'huile végétale, dès que l'eau de refroidissement du moteur atteignait 60°C, confondant ainsi *température du moteur* (?) et *température de la chambre de combustion*.

- quelle est la granulométrie d'une huile pure non réchauffée et, quand elle est injectée, quelles influences ont les aspects thermiques sur les performances et le déroulement de la combustion ?

Granulométrie de jets de mélanges d'huile de coton et de fioul :

Lors de l'étude sur les brûleurs avec T. Daho, nous avons examiné et vérifié l'influence de la réduction de la viscosité sur le régime d'atomisation du jet d'huile végétale. Pour cela, nous avons réchauffé l'huile végétale et déterminé qu'à partir de 125°C pour l'huile de coton, on obtenait à la fois un spray complet et une granulométrie adaptée pour un fonctionnement en brûleur (gouttelettes : diamètres moyens de Sauter inférieurs ou égaux à 100 µm) voir 3.2.3.2.

Ici, nous avons utilisé la réduction de viscosité par mélanges avec du fioul essentiellement parce que c'est la méthode qui sera la plus utilisée car la plus facile à mettre en œuvre, en particulier dans les zones rurales en développement.

L'objectif de ce travail est de déterminer la distribution de tailles des gouttelettes d'huile de coton raffinée et de ses mélanges avec du carburant diesel. D'observer également l'influence de ces tailles de gouttelettes, en relation avec la charge du moteur, sur les performances, les taux de dégagement de chaleur et les émissions polluantes d'un moteur diesel à injection directe.

Les carburants testés sont résumés dans le tableau 34. Les caractéristiques du fioul et de l'huile de coton raffinée sont données en tableau 29.

Fuel type	Composition	Kinematic visc. @ 25°C mm ² /s
Diesel fuel	Pure diesel fuel	4.7
CSO20	20% vol. CSO + 80% vol. diesel fuel	7.8
CSO40	40% vol. CSO + 60% vol. diesel fuel	9.3
CSO60	60% vol. CSO + 40% vol. diesel fuel	15.3
CSO80	80% vol. CSO + 20% vol. diesel fuel	24.5
CSO100	Pure refined cottonseed oil	47.6

Tableau 34 : nomenclature et viscosité à 25°C des carburants testés.

Le dispositif de mesure de la taille des gouttelettes comprend un système d'injection de carburant Bosch (0-400 bars) et un système de diffraction laser (Malvern Spraytec, voir figure 56) de mesure de distribution de taille des gouttelettes de carburant. Les différents mélanges ont été testés à une température entre 25 et 30 ° C.



Figure 56 : le Spraytec de la société Malvern.

Un injecteur de type Bosch DL30S1202 a été taré à 175 bars et les combustibles ont été injectés dans l'air à la pression atmosphérique.

La Figure 57 indique la distribution de la taille des gouttelettes issues de la pulvérisation des six carburants étudiés.

L'analyse de la distribution de taille de gouttelettes (Fig. 57) montre que pour un pourcentage important d'huile de coton dans le fioul (CSO80), le mélange a un comportement proche de celui de l'huile de coton pur pour laquelle la distribution de taille des gouttelettes est supérieure à la taille habituelle observée pour les moteurs diesel [42]. La limite d'incorporation d'huile de coton est proche de 40%, valeur au-dessus de laquelle il y a apparition de deux populations de gouttelettes. CSO60 présente déjà 25 % de gouttelettes au dessus de 200 μm et CSO80 50 % tout comme CSO100.

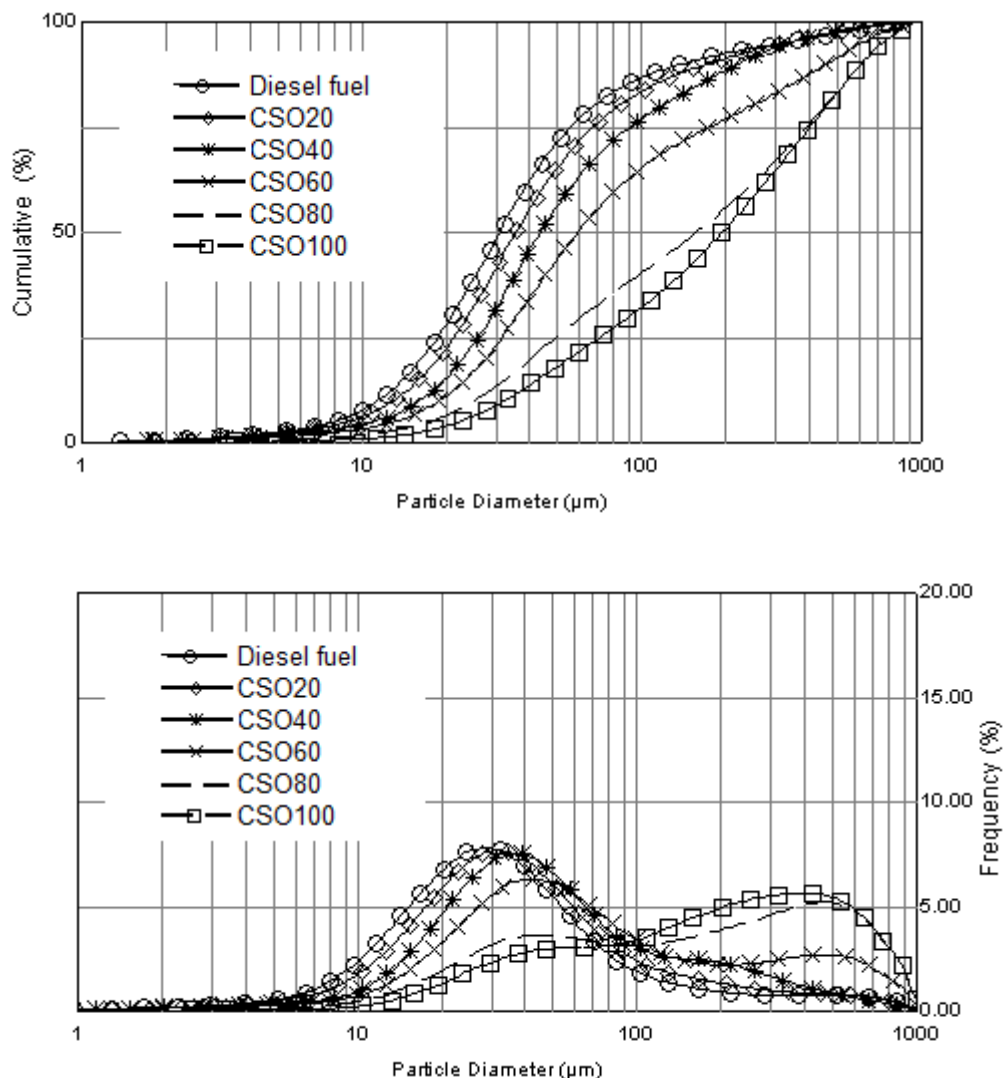


Figure 57 : répartition cumulative et fréquence des tailles de gouttelettes dans le jet pour les 6 carburants.

Le tableau 35 donne les valeurs des diamètres caractéristiques (D_{V10} , D_{V50} , D_{V90} , et SMD Sauter Mean Diameter) des gouttelettes issues de la pulvérisation des six carburants

étudiés.

Dv(10), Dv(50) et Dv(90) donnent la granulométrie en-dessous de laquelle 10, 50 et 90% des gouttes sont comprises. Le SMD est défini par le diamètre de la goutte correspondant au rapport volume/surface de l'ensemble du spray.

Fuel type	D _{V10} (µm)	D _{V50} (µm)	D _{V90} (µm)	SMD (µm)
Diesel fuel	11.28	31.06	139.29	20.68
CSO20	12.83	35.76	171.56	24.09
CSO40	16.01	43.8	221.5	28.45
CSO60	18.77	59.21	456.64	35.66
CSO80	24.99	157.38	607.72	57.84
CSO100	32.16	194.46	607.31	75.63

Tableau 35 : diamètres caractéristiques des gouttelettes des 6 carburants testés.

Donc, dans un moteur diesel standard, sans préchauffage du combustible ou modification de la pression d'ouverture des injecteurs, la distribution de la taille des gouttelettes à haute teneur en huile de coton est très différente de celle obtenue avec du carburant diesel. Cela est dû à l'augmentation de la viscosité cinématique et de la tension de surface avec le taux d'huile végétale dans les mélanges.

L'incorporation d'huile de coton dans le fioul devrait être limitée à 40% vol. pour conserver des tailles de gouttelettes du mélange telles que 50 % de ces-dernières aient des diamètres inférieurs à 50 µm.

Influences de la présence de grosses gouttelettes dans le jet d'huile de coton sur les performances et la combustion en fonction de la charge du moteur.

Les essais ont été effectués au Cirad dans le laboratoire Biomasse Energie de Montpellier, avec la collaboration du Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement de Ouagadougou (Burkina Faso). Le moteur est de marque Hatz (modèle 1D80) dont les caractéristiques sont décrites dans le tableau 36.

Characteristics	Specification
Type	HATZ 1D80, four strokes, air cooled
Combustion	Direct injection
Injection pump	BOSCH
Number of cylinder	1
Displacement	667 cm ³
Bore	100 mm
Stroke	85 mm
Compression ratio	18:1
Maximum torque	38.5 Nm at 1850 rpm

Tableau 36 : caractéristiques du moteur Diesel Hatz monocylindre.

L'instrumentation est complète et suffisante pour déterminer les taux de dégagement de chaleur simplifiés, elle comprend : un capteur de pression cylindre (type 6125B11 Kistler), un amplificateur de charge (type 5011B10 Kistler), un capteur de pression d'injection (Kistler 4067A) et codeur angulaire (2614A Kistler), avec une résolution de 720 points par cycle, soit un point par degré vilebrequin. L'acquisition se fait sous

LabVIEW grâce à une carte National Instrument (NI USB-6251), les données sont exportées au format ASCII pour un traitement avec MATLAB.

Chaque carburant a été testé successivement à 25%, 50%, 75% et 100% de la charge maximale du moteur à 2500 tours par minute.

Résultats sur les mélanges CSO20 à CSO100 :

La consommation spécifique de carburant (figure 58) augmente avec le pourcentage de CSO dans le mélange en raison de la plus grande masse de carburant injecté (ceci est dû à l'augmentation de la densité du mélange avec le taux d'huile incorporé).

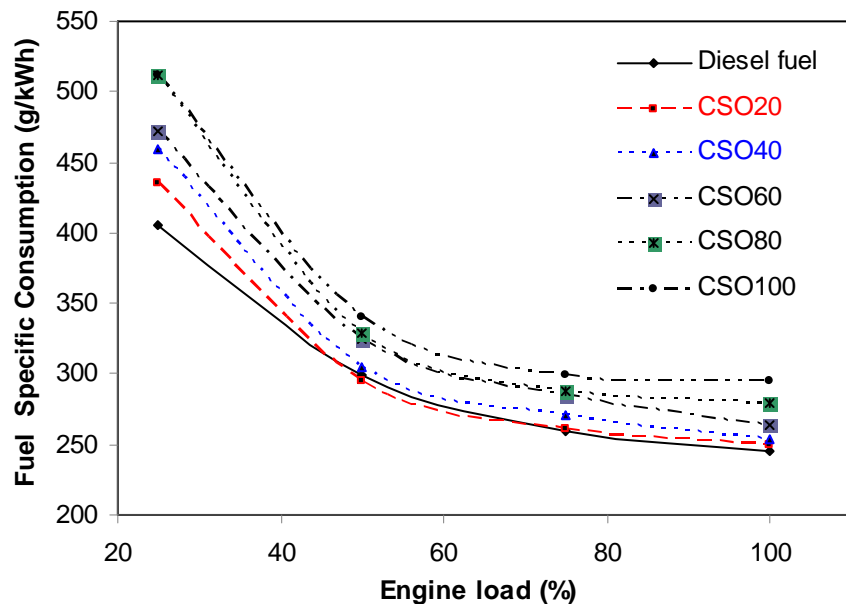


Figure 58 : consommation spécifique en fonction de la charge pour les 6 carburants à 2500 tr/mn.

La figure 59 indique le rendement global pour tous les combustibles. Ils sont très similaires. Ces résultats sont en accord avec les études antérieures qui ont montré que les huiles végétales pouvaient avoir de meilleurs rendements que du carburant diesel en fonction des conditions de fonctionnement du moteur. Les différences observables entre faible charge (25%) et des charges plus élevées, sont faibles compte tenu des incertitudes de l'ordre de 3% sur la détermination du rendement.

Remarque : l'existence d'une pompe de gavage supplémentaire dans le circuit d'alimentation réduit la perte de charge liée à la viscosité élevée de l'huile de coton pur ou de ses mélanges. Cette réduction de chute de pression associée à un taux inférieur de fuite entre le piston et le cylindre de la pompe à injection (type piston plongeur), permet une sur-consommation volumique d'huile de coton qui compense sa plus faible teneur en énergie. En effet, pour un même volume injecté, le ratio de la teneur énergétique du fioul par rapport à l'huile de coton est d'environ 1,07. Ainsi, la réduction du taux de fuite dans le cas de l'huile végétale ou de ses mélanges peut expliquer la puissance égale obtenue pour les six carburants. Ce résultat montre que la viscosité du combustible et la configuration du circuit d'alimentation sont des facteurs déterminants dans le rendement d'un moteur utilisant des huiles végétales comme carburant.

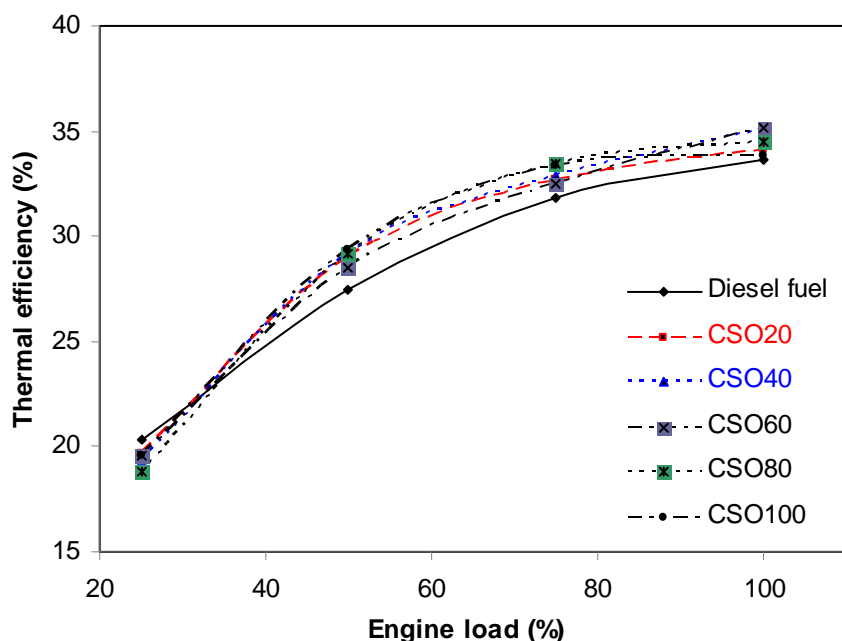


Figure 59 : rendement global en fonction de la charge pour les 6 carburants à 2500 tr/mn.

En termes d'émissions, les figures 60 et 61 indiquent les résultats sur le CO et les NOx. On n'observe pas d'augmentation de CO avec les mélanges CSO60, CSO80 ou l'huile pure CSO100 par rapport aux mélanges CSO20 et CSO40 qui présentent pourtant des granulométries de gouttelettes, a priori plus favorables à la combustion. Les NOx présentent une tendance déjà décrite, à savoir une réduction avec les huiles végétales par rapport au fioul ou gazole, toute condition de fonctionnement égale.

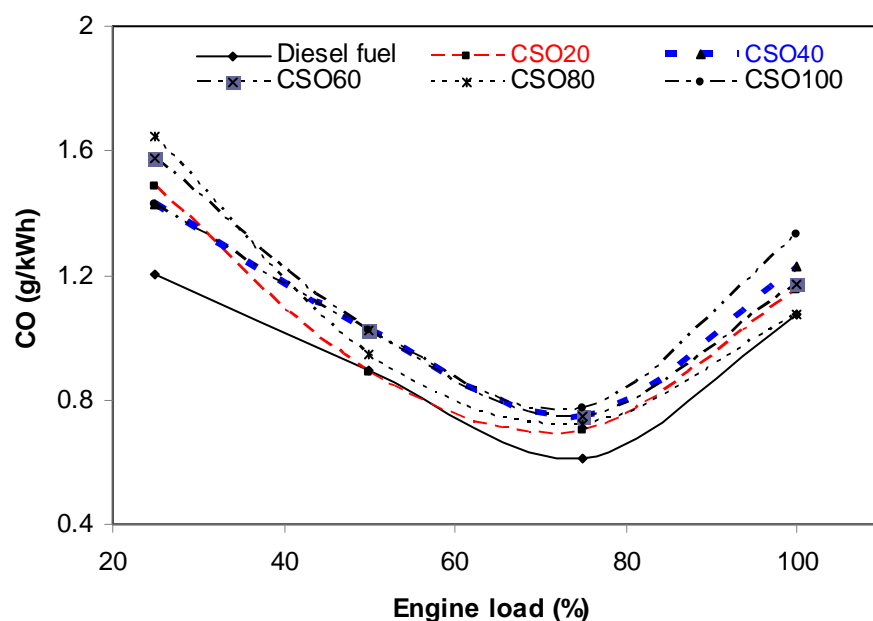


Figure 60 : teneur en CO en fonction de la charge pour les 6 carburants à 2500 tr/mn.

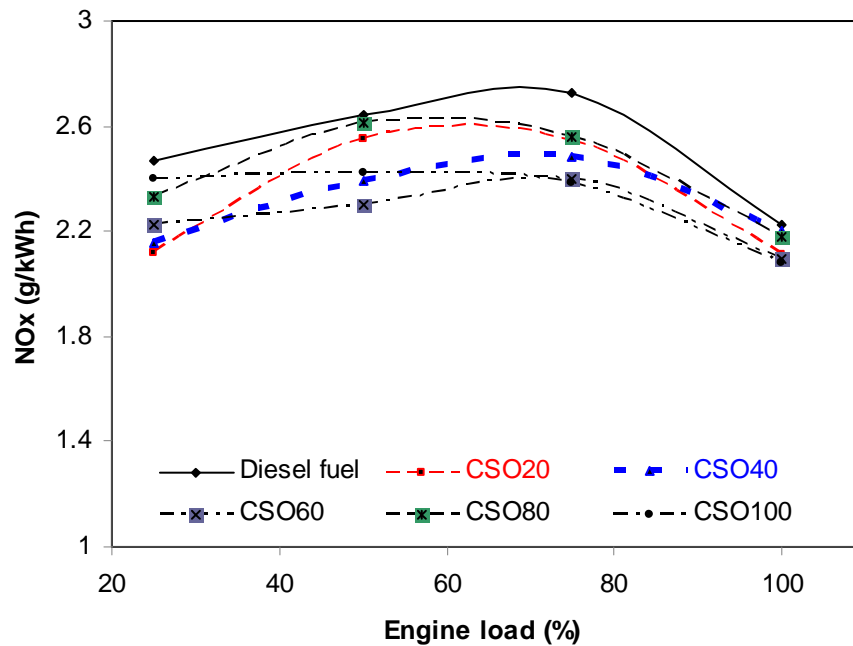


Figure 61 : teneur en NOx en fonction de la charge pour les 6 carburants à 2500 tr/mn.

En fait, les caractéristiques du jet semblent avoir peu d'effet sur les performances du moteur. Et cependant, de grosses gouttelettes existent dans ce jet quand sa viscosité dépasse 10 mm²/s.

Résultats sur la combustion entre huile de coton pure et fioul.

L'analyse des paramètres de la combustion a été réalisée pour le fioul et CSO100 à 2500 tours par minute pour les trois charges du moteur: 25%, 50% et 100%. La figure 62 indique les variations de pression dans le cylindre pour les deux carburants aux trois charges en fonction du temps, ici en fonction de l'angle vilebrequin (0 correspondant au Point Mort Haut, quand le piston est au plus haut de sa course et la chambre de combustion à son volume minimal).

On n'observe pas de différence significative entre les deux carburants quelle que soit la charge.

Les délais d'inflammation, plus long pour l'huile de coton à 25 % de la puissance deviennent plus courts à 50 % et 100 % de la charge. Ceci confirme qu'en ce qui concerne l'initiation de la combustion, les aspects thermiques prédominent sur la granulométrie des gouttelettes du jet.

Fuel type	Diesel fuel	CSO100	Diesel fuel	CSO100	Diesel fuel	CSO100
Engine load (%)	25	25	50	50	100	100
Ignition delay (°CA)	4.05	4.55	4.04	3.06	2.02	1.91

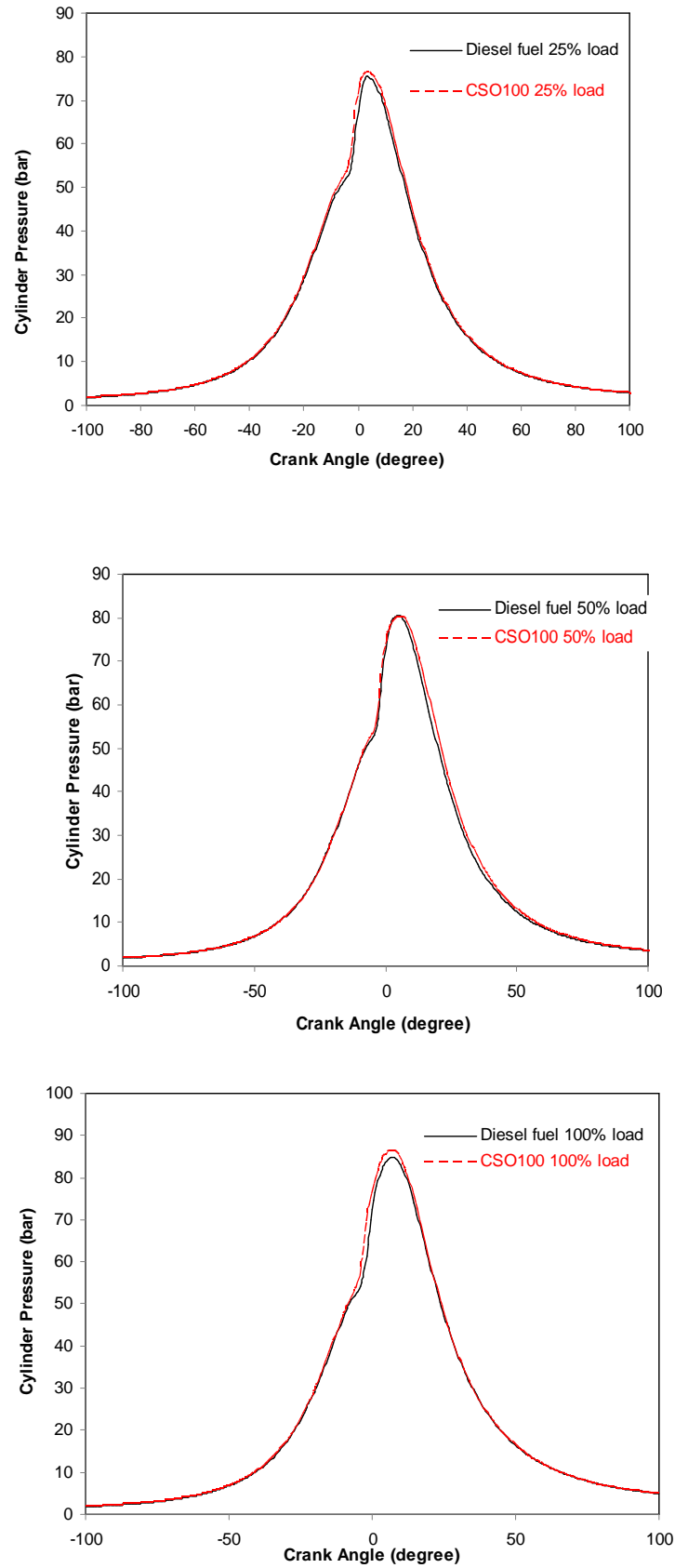


Figure 62 : courbes de pression cylindre comparées aux 3 charges à 2500 tr/mn pour le fioul et l'huile de coton pure.

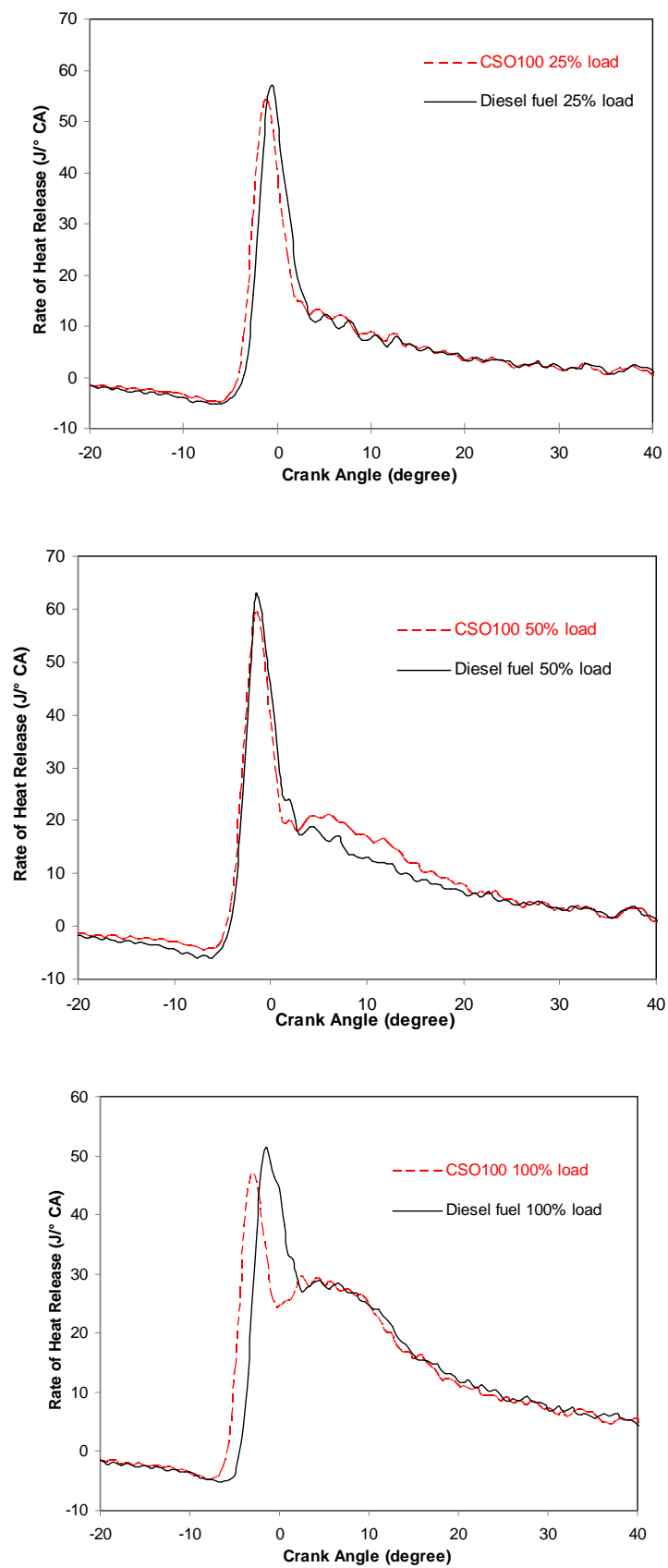


Figure 63 : taux de dégagement de chaleur comparés aux 3 charges à 2500 tr/mn pour le fioul et l'huile de coton pure.

En ce qui concerne la combustion développée, comme l'indiquent les taux de dégagement de chaleur de la figure 63, les différences sont peu perceptibles contrairement à celles observées pour les diamètres des gouttelettes. Cela pourrait s'expliquer par la présence des petites gouttelettes du jet d'huile de coton qui initieraient la combustion, conduisant à un comportement similaire à la combustion du fioul.

conclusions

En fait, la distribution de la taille des gouttelettes est un paramètre important dans le fonctionnement d'un moteur diesel. Mais il apparaît que, la performance globale, l'analyse du taux de dégagement de chaleur et les émissions à l'échappement ne permettent pas une évaluation précise de cette importance, autrement dit, ne puissent prédire une «bonne ou mauvaise qualité» de combustion quand on utilise une huile végétale en remplacement du fioul. Même si, l'influence de la distribution granulométrique des gouttelettes sur la polymérisation et la formation de dépôts dans les chambres de combustion, semble toujours être l'hypothèse la plus attrayante.

En conclusion, il apparaît nécessaire d'approfondir les mécanismes de décomposition des gouttelettes d'huile végétale en relation avec leur taille et les conditions thermiques.

3.3. Etude et mise en œuvre des modifications techniques de moteurs et brûleurs.

L'optimisation de la combustion permet d'orienter les travaux d'adaptation des moteurs et des brûleurs. C'est une activité menée en partenariat avec des constructeurs et qui concerne également l'utilisation de déchets, telles les vinasses de distilleries ou les huiles de friture usagées.

C'est la partie finalisée de mes travaux. Pilotés par des projets de « terrain », ils s'effectuent sous la forme de contrats publics ou privés, ces derniers étant majoritaires.

Ces activités qui amènent du transfert de technologie, s'appuient sur les recherches citées précédemment et s'inspirent des sciences de l'ingénieur et de l'énergétique.

Les deux paragraphes suivants sont extraits d'un ouvrage³⁵ réalisé en 2007 pour le Ministère des Affaires Etrangères et l'ADEME.

3.3.1 Etude et mise en œuvre des modifications techniques de moteurs.

Dans un moteur diesel, la combustion se déclenche par auto-inflammation : le combustible, finement nébulisé par un injecteur, est introduit dans une masse d'air suffisamment comprimée pour que sa température atteigne la valeur d'inflammation du combustible.

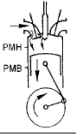
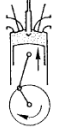
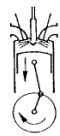
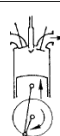
L'énergie dégagée par la combustion engendre alors un mouvement rectiligne du piston transformé en mouvement rotatif en sortie de vilebrequin par l'intermédiaire du système bielle-manivelle.

Cycle Diesel à Quatre temps

Les moteurs diesels fonctionnent selon le principe du cycle à quatre temps qui comprend les phases suivantes : admission, compression, inflammation-détente et échappement.

³⁵ **G. Vaitilingom**, 2007. Chapitre « Extraction, conditionnement et utilisations des huiles végétales pures carburant », p. 207-272. Guide Technique pour une utilisation énergétique des huiles végétales. Publication Ministère des Affaires Etrangères/ADEME. 288 p.

Applications pratiques – partie finalisée des travaux

Course du piston	Phases	Opérations	Schéma
Premier temps du P.M.H. au P.M.B.	Admission	Remplissage des cylindres avec de l'air à pression atmosphérique ou précomprimé.	
Deuxième temps du P.M.B. au P.M.H.	Compression	L'air est fortement comprimé et porté à une température supérieure à celle d'auto-inflammation du carburant (+ de 400 °C). Le rapport volumétrique est très élevé (15/1 à 22/1).	
Troisième temps du P.M.H. au P.M.B.	Inflammation - détente	Le carburant est injecté sous pression (100 à 200 bars) en fin de compression. Il s'enflamme spontanément au contact de l'air chauffé. La combustion dure tant que dure l'injection.	
Quatrième temps du P.M.B. au P.M.H.	Echappement	Évacuation des gaz brûlés.	

Chaque cycle correspond à deux tours de vilebrequin. On exprime généralement le temps au cours d'un cycle en degrés angulaires de rotation du vilebrequin (°V ou DV). Ainsi, au régime de 3000 tr/mn par exemple, 1 °V représente 0.056 ms ; un cycle, soit 2 tours de moteur, s'effectue en 40 ms, et il se produit donc 25 cycles par seconde.

Délai d'inflammation : le carburant injecté doit s'auto-enflammer sous l'effet de l'élévation de température résultant de la forte compression de l'air. En fait, il s'écoule un certain temps entre le début de l'injection et le début de la combustion. Cet intervalle de temps s'appelle le délai d'inflammation.

Les moteurs à injection directe et les moteurs à injection indirecte.

Globalement, il existe deux familles de moteurs à cycle Diesel : **les moteurs à injection direct et les moteurs à injection indirecte** (voir figures suivantes).

*** les moteurs à injection directe.** Ils équipent les tracteurs agricoles et routiers, et grand nombre de moteurs industriels de toute puissance : de 0,5 kW jusqu'au mégawatt. Sans modifications, ceux-ci n'acceptent pas les huiles végétales naturelles.

Alimentés avec des huiles végétales non estérifiées ils connaissent rapidement des problèmes de fonctionnement. Ces problèmes sont, la formation de dépôts charbonneux à l'intérieur du moteur (voir photos suivantes) et une forte *dispersion cyclique*³⁶ pouvant conduire à des dégâts mécaniques parfois importants.

³⁶ Dans certains cycles la combustion n'a pas lieu. Jusqu'à 1 cycle tous les 50, c'est inaudible sur un moteur 4 cylindres.

Applications pratiques – partie finalisée des travaux



Photo 9 :Piston injection directe au fioul. (Photo CIRAD)



**Piston injection directe : 21 heures
huile végétale (Photo CIRAD)**

L'utilisation de mélanges significatifs d'huile végétale et de fioul (contenant plus de 10 % d'huile) ne résout pas les problèmes. L'encrassement existera toujours, seul le temps de formation est fonction du taux d'huile végétale.

Actuellement, les systèmes à rampe commune (common rail) se généralisent que ce soit pour les véhicules routiers que non-routiers. Compte tenu des pressions d'injection et du contrôle possible de l'injection, il n'est pas impossible qu'une stratégie adaptée aux huiles végétales puisse résoudre les problèmes rencontrés jusqu'à présent.

* **les moteurs à injection indirecte.** Ils désignent les moteurs à préchambre, à chambre de turbulence, à chambre à réserve d'air, etc. Ce sont des moteurs à chambre de combustion « divisée ».

Ils équipent une partie des véhicules automobiles, certains très gros moteurs industriels (supérieur au Mégawatt), l'ensemble des engins devant polluer le moins possible leur environnement. Enfin, une gamme encore fournie de petits moteurs industriels.

Ces derniers tolèrent les huiles végétales brutes (mais filtrées efficacement). Un fonctionnement correct est même à signaler avec les moteurs à chambre de turbulence (répandue en automobiles Diesel).

Mais les tendances des 20 dernières années, les ont rendus minoritaires face aux injections directes moins "gourmands" en carburant.

Applications pratiques – partie finalisée des travaux

L'huile végétale pure dans des tracteurs non modifiés : réalité ou mythe ?

Les huiles végétales brutes ou raffinées ne sont pas utilisables en l'état dans des moteurs diesels à injection directe. Ces derniers équipent les tracteurs agricoles depuis plus de 25 ans, or on entend dire que nombre d'utilisateurs emploient depuis longtemps, dans la plus grande discrétion, des huiles de colza ou de tournesol dans leurs propres tracteurs n'ayant subi aucune modification. Qu'en est-il de ces informations ?

Faute de pouvoir accéder à des témoignages vérifiables, rappelons les raisons qui obligent à modifier les moteurs à injection directe.

Lorsqu'ils délivrent jusqu'à la moitié de leur puissance nominale, ces moteurs présentent des températures moyennes de chambre inférieures à 200°C. Or, l'huile de tournesol possède une température de point éclair largement supérieure à celle du fioul : 316°C pour l'huile contre 96°C pour le fioul. Ce qui signifie qu'une part de gouttelettes d'huile ne va pas se vaporiser mais va se « coller » aux parois provoquant des dépôts « goudronneux » semblables à ceux bien connus des friteuses de cuisine. Ces dépôts vont vite s'accumuler sur le nez des injecteurs, perturbant ainsi la pulvérisation et dégradant le fonctionnement. Ils vont également se loger dans la gorge du premier segment lui interdisant son élasticité, ce qui mène à des grippages et/ou une usure rapide de celui-ci. Il y a perte de compression, difficultés de démarrage à froid et détérioration du rendement (augmentation anormale de la consommation). Si alors la dilution d'huile végétale dans le lubrifiant dépasse 3%, il peut y avoir une rapide polymérisation de l'huile de graissage provoquant le grippage total du moteur.

Dans les moteurs diesels à injection indirecte de type « chambre de turbulence », la température moyenne de la *préchambre** est d'environ 500 à 600°C dès 10 % de puissance délivrée. Les huiles végétales brûlent complètement.

Enfin, et c'est ce dernier point qui peut faire douter de la validité des témoignages : les pompes à injection rotatives (Lucas CAV rotodiesel et Stanadyne) qui équipent un très grand nombre de tracteurs agricoles, cassent par temps froid quand le pourcentage d'huile dépasse 35%. Voilà qui aurait dû engendrer une tout autre réputation à l'huile végétale pure avant de décourager les plus fanatiques, compte tenu des coûts élevés des pompes à injection en pièce de rechange.

*: ici il s'agit de chambre « divisée ».

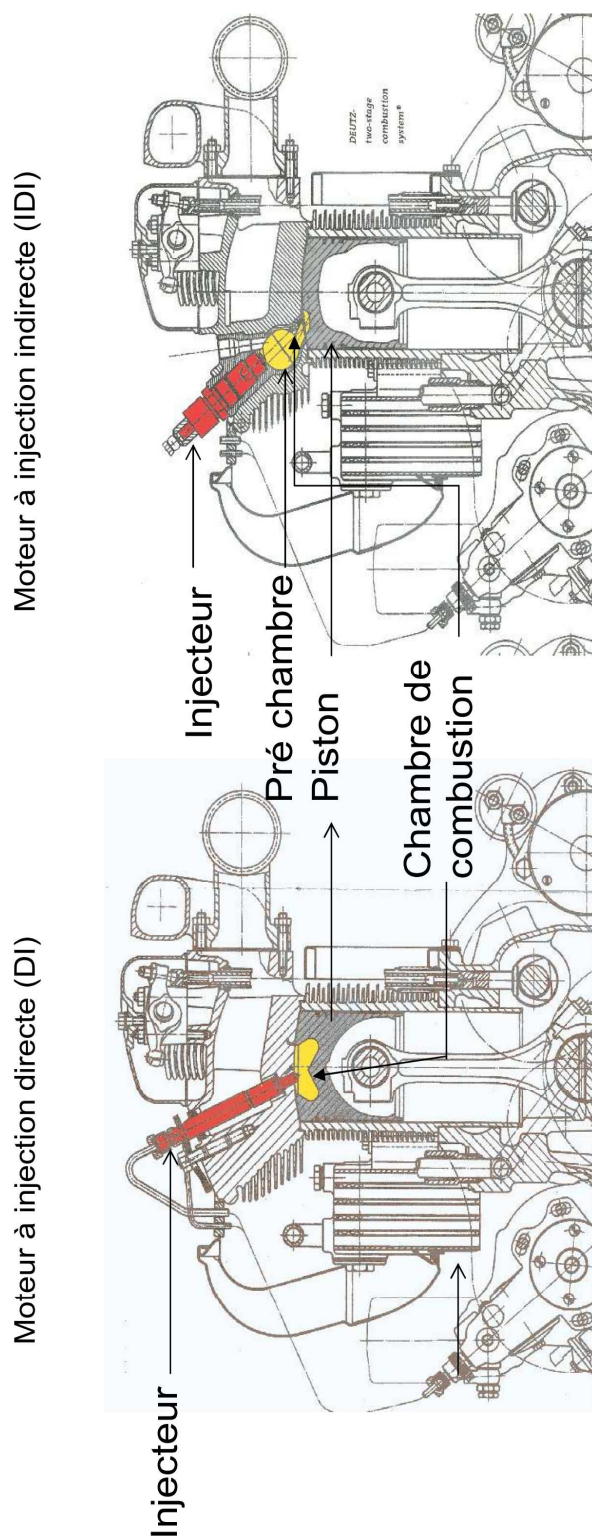


Figure 64 : illustration de l'architecture de deux moteurs diesels à injection directe et à injection indirecte.

Applications pratiques – partie finalisée des travaux

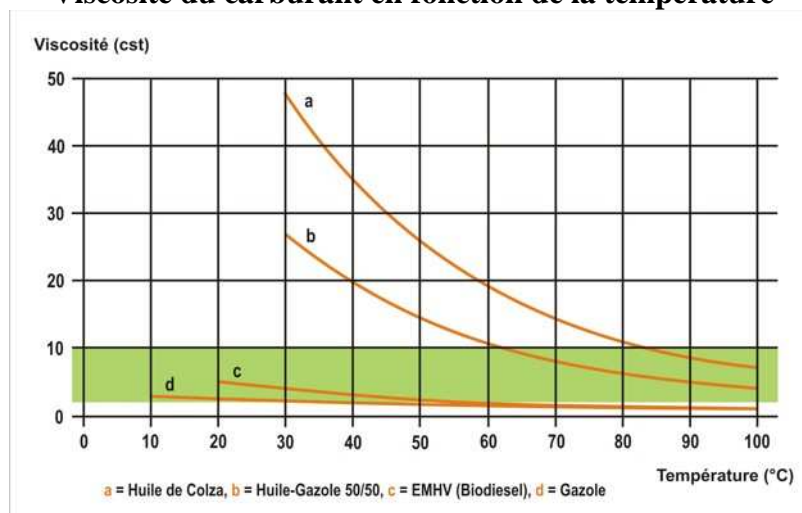
Problèmes rencontrés lors de l'utilisation de l'huile végétale pure carburant

Parmi les caractéristiques physico-chimiques particulières des huiles végétales, deux d'entre-elles influencent directement le bon fonctionnement des moteurs diesels : la viscosité élevée qui pose des problèmes d'ordre pratique et la composition chimique en acides gras qui entraîne une chaleur élevée d'évaporation, et ne permet pas une distillation complète des huiles végétales.

☞ La viscosité

La viscosité des huiles est significativement plus élevée que la viscosité des gazoles à température ambiante, ce qui pose des problèmes de pompage et d'écoulement à travers les tuyaux et les filtres, mais également une détérioration des caractéristiques du jet injecté dans la chambre du moteur. Dans le schéma ci-dessous, la zone verte figure la zone de viscosité normalisée pour les équipements diesels. Il est à noter qu'à partir de 83°C l'huile de colza (courbe a) respecte les exigences techniques établies. Un constat similaire peut être fait pour les autres huiles (sauf le ricin qui nécessite plus de 150°C). Les températures de réchauffage à atteindre sont fonction de la viscosité de l'huile ou du mélange fioul/huile en présence. Par exemple, le mélange 50 % fioul et 50 % colza (courbe b) ne devra être réchauffé qu'à 62 °C « seulement ».

Viscosité du carburant en fonction de la température



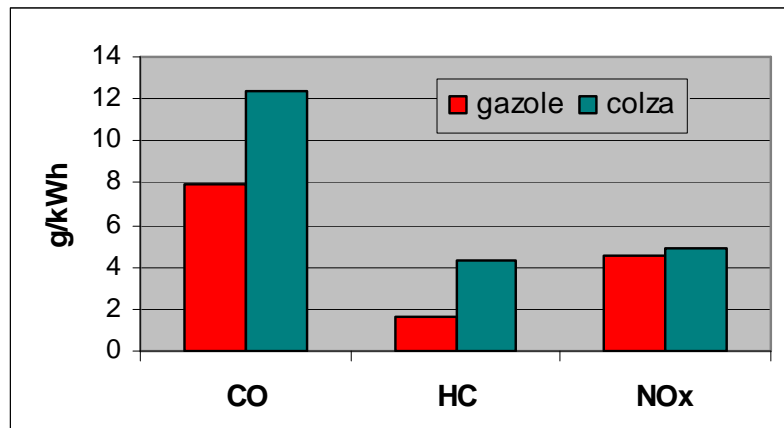
www.huilecarburant.free.fr

L'ajout d'un réchauffeur et d'une pompe dans le circuit d'alimentation permettra d'éliminer le problème des viscosités des huiles végétales.

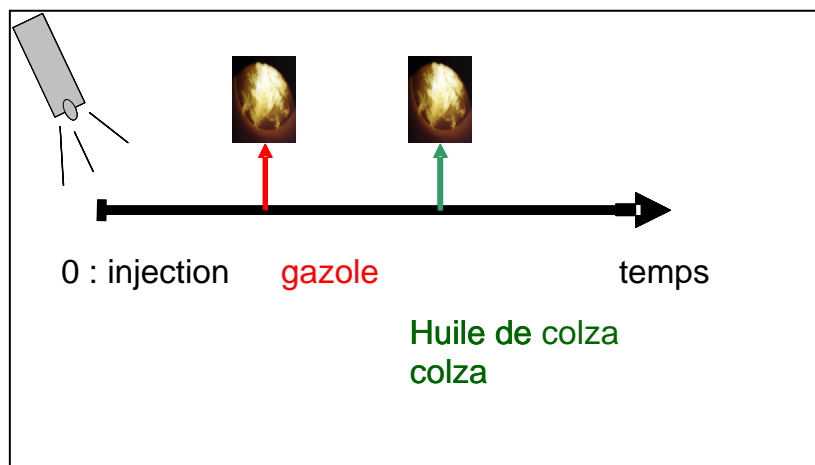
Applications pratiques – partie finalisée des travaux

☞ **Influences de la composition chimique des huiles**

Pour des températures de chambre inférieures à 500°C



Gaz rejeté avec une température inférieure à 500°C.
Schéma CIRAD

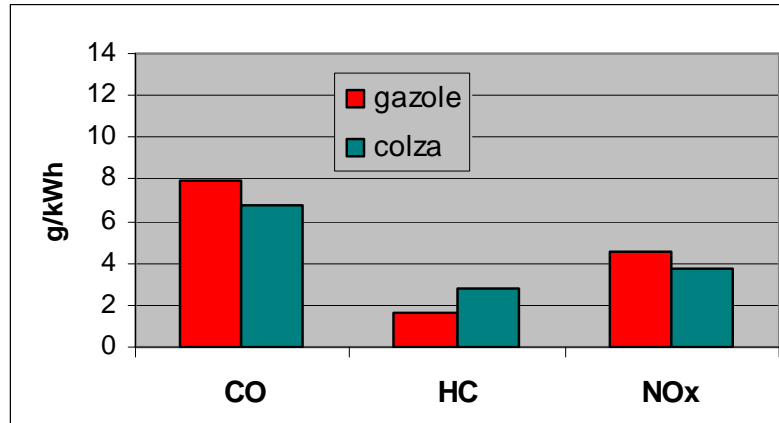


Délai d'inflammation en fonction du carburant.
Schéma CIRAD

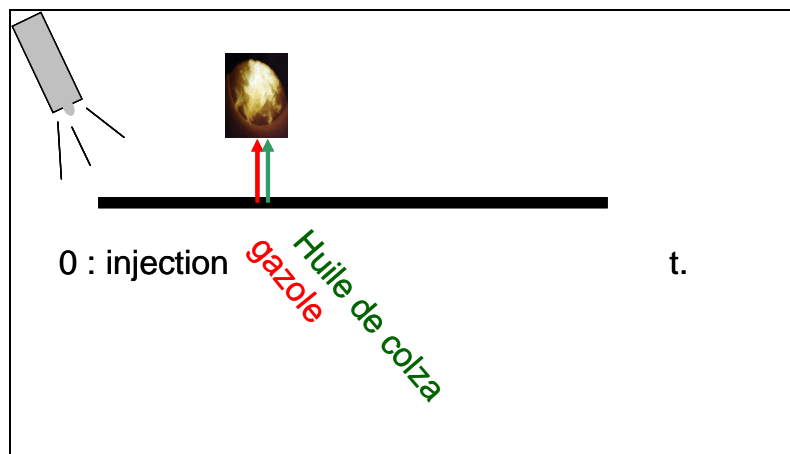
Le délai d'inflammation est plus long pour une majorité des huiles quand la température de la chambre de combustion est inférieure à 500°C (voir figures suivantes). Par ailleurs, la combustion de l'huile, même réchauffée, purifiée et raffinée, ne s'effectue pas complètement, ce qui entraîne des pertes de puissance et de rendement et des rejets en CO, NOx et HC plus importants pour les huiles que pour le gazole. De plus, au niveau mécanique, il se produit une dégradation et un encrassement des nez d'injecteurs, des segments et des cylindres conduisant à des détériorations mécaniques.

Applications pratiques – partie finalisée des travaux

Pour des températures de chambre supérieures à 500°C



Gaz rejeté avec une température supérieure à 500°C.
Schéma CIRAD



Délai d'inflammation en fonction du carburant.
Schéma CIRAD

Pour des températures de chambre supérieures à 500°C, il est constaté une nette amélioration de comportement de l'huile. Le délai d'inflammation est quasi-identique à celui du gazole et, la combustion étant complète, les rejets observés peuvent être moins importants que ceux du gazole.

Globalement, le fonctionnement est correct et très peu différent du fonctionnement au gazole, avec des performances équivalentes et des rendements globaux parfois meilleurs que ceux du gazole.

Applications pratiques – partie finalisée des travaux

☞ **En conclusion :**

- Il est possible de résoudre les difficultés pratiques d'usage des huiles végétales en les réchauffant, afin de ramener leur viscosité dans des valeurs proches de celles des produits pétroliers.
- Une fois la viscosité de l'huile ou du mélange ramenée dans les valeurs acceptées par les équipements d'alimentation des moteurs, il demeure les problèmes de combustion incomplète dus à la nature chimique différente des huiles vis-à-vis des fiouls et gazoles.
- Il apparaît que si la température moyenne de la chambre de combustion est suffisamment élevée, les huiles végétales courantes brûlent complètement, avec de bons rendements globaux et des niveaux d'émissions polluantes similaires à celles des gazoles.
- Il y a plusieurs façons de s'assurer d'un niveau de température suffisant des chambres de combustion (voir paragraphes suivants) :
 - par modifications mécaniques des pistons et de pièces internes au moteur,
 - sans modifications mécaniques, en utilisant un fonctionnement en bicarburation.

Applications pratiques – partie finalisée des travaux

Modifications des chambres de combustion des moteurs à injection directe :

Si l'on ne veut pas modifier le carburant (estérification, par exemple), on peut agir sur les chambres de combustion afin que les conditions de températures, lors du fonctionnement, permettent une combustion complète des huiles végétales.

Mais ces modifications doivent respecter la conception et l'architecture interne du moteur, tout en respectant les matériaux et les jeux fonctionnels mécaniques. Il faut alors que les températures maximales atteintes restent raisonnables.

Ce type de modifications, développées au CIRAD³⁷ depuis 1990, permet toujours l'usage du fioul (et donc de tout mélange d'huile et de fioul) sans pertes de puissance et sans interventions mécaniques supplémentaires. Cet aspect est important et représente un des avantages forts de cette solution. A tout moment, les utilisateurs peuvent remplir le réservoir indifféremment avec de l'huile ou du fioul.

Description des modifications des pistons :

Ils sont modifiés pour recevoir une chambre de forme spéciale en acier réfractaire.



Exemple de réalisation.
Photo CIRAD

Conception CAO des modifications.
Photo CIRAD

On constate qu'après 500 heures de fonctionnement à l'huile, le piston est intact. L'huile a la qualité d'être lubrifiante, cette caractéristique permet d'allonger la longévité des pièces du moteur.

Piston modifié après 500 heures à l'huile de tournesol



³⁷ Modifications initiées par P. Higelin, lors de ses travaux de thèse (88-91).

Applications pratiques – partie finalisée des travaux

Adaptation type « bicarburation » sur les moteurs à injection directe :

Une autre voie permet de ne pas faire de modifications internes des moteurs, c'est l'adoption d'un circuit d'alimentation en bicarburation. Ce procédé a été mis en place et appliqué par le CIRAD sur des tracteurs, des camions et des groupes électrogènes.

Il consiste à installer un second circuit d'alimentation pour l'huile végétale pure en parallèle à celui du gazole (voir figure 65). Sur ce circuit, on trouve en série :

- un filtre à carburant adapté à l'huile végétale,
- un réchauffeur, pour réduire la viscosité de l'huile et se rapprocher de celle du gazole
- une pompe de circulation et de gavage de la pompe à injection,
- une électrovanne qui permet de basculer d'un carburant à l'autre ; c'est-à-dire, permettant au véhicule de fonctionner soit au gazole, soit à l'HVP.

• **Schéma des modifications du circuit d'alimentation :**

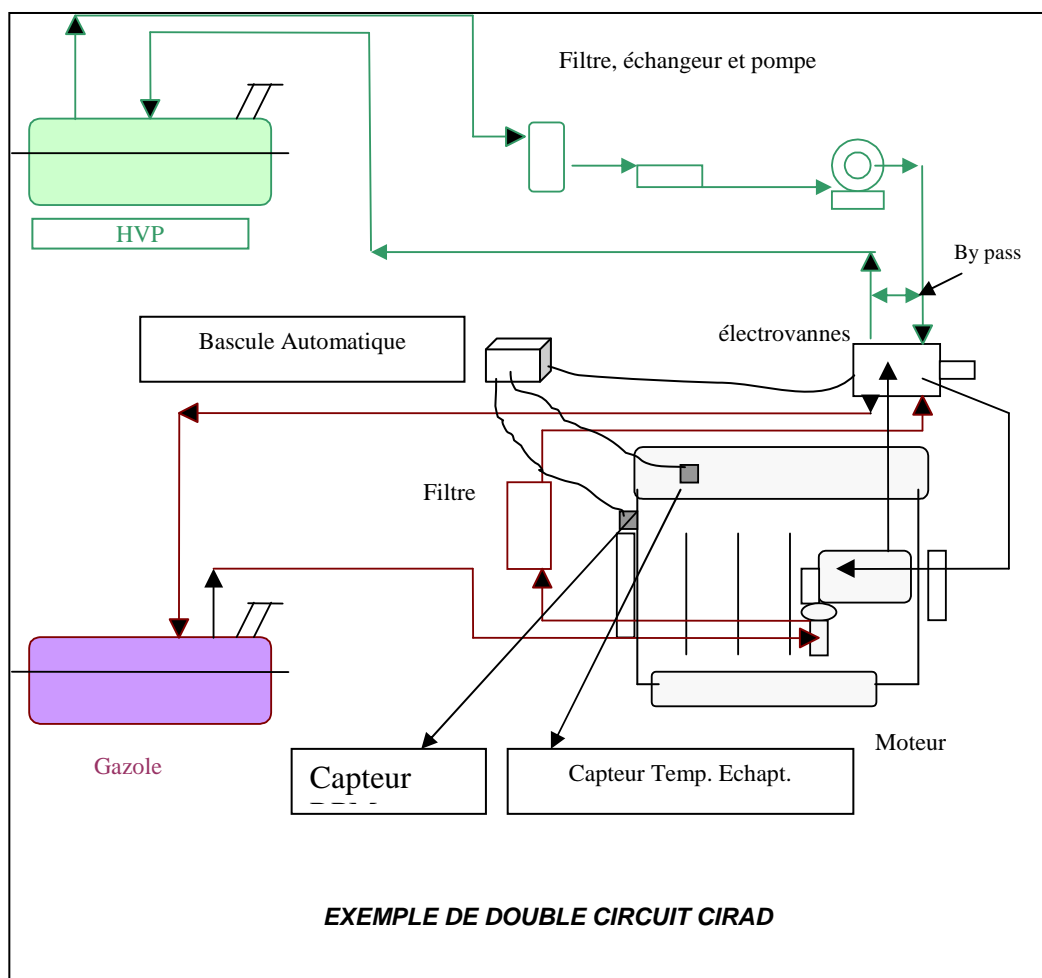


Figure 65 : schéma de double circuit d'alimentation HVP/gazole « Bicarburation » du Cirad.

Applications pratiques – partie finalisée des travaux

• Contrôle des conditions de bascule gazole/huile végétale

Le principe de la bicarburation est simple : tant que les chambres de combustion n'ont pas les niveaux de température suffisants pour une bonne combustion de l'huile végétale, le moteur reste alimenté en gazole.

Dès que la température des chambres est suffisante, le système de bascule pilote l'électrovanne qui alimente alors le moteur, grâce au circuit huile végétale.

Le pilotage du système de bascule peut s'effectuer en contrôlant ces deux paramètres :

- la température d'échappement,
- la vitesse de rotation du moteur

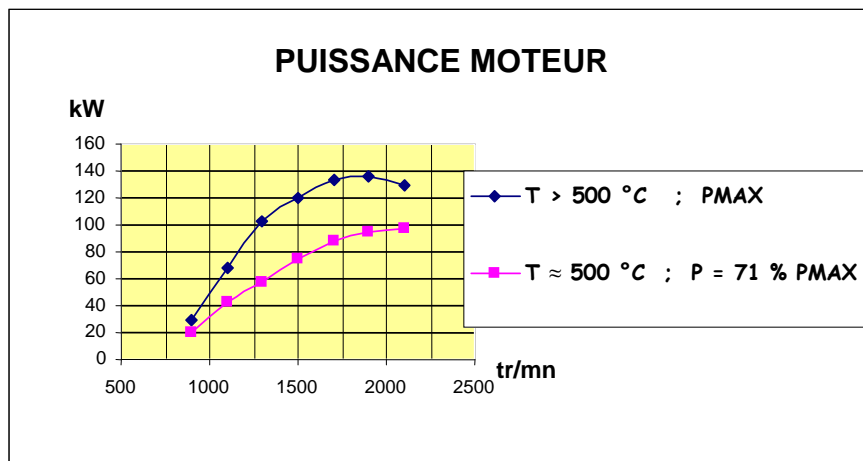
☞ La température de l'échappement

La température des gaz d'échappement est proportionnelle à la température moyenne des chambres de combustion. On peut la mesurer en plaçant une sonde au niveau de la sortie des chapeaux d'échappement dans le flux gazeux.

☞ La vitesse de rotation du moteur

On peut la mesurer grâce à des capteurs de rotation qui seront connectés au système de bascule automatique. Il est à noter que pour des applications à vitesse constante, (groupes électrogènes, certains groupes de pompage,...) ce capteur est inutile. La valeur de la vitesse est directement programmée comme étant constante dans le système de bascule.

• Importance de la charge³⁸ du moteur sur la bascule gazole/huile végétale.



Enveloppe de pleine charge et courbe à charge partielle sur un moteur à injection directe. (Graphique CIRAD)

Le graphique ci-dessus, présente les courbes de puissances mesurées sur un moteur diesel à injection directe.

³⁸ Pourcentage de la puissance d'un moteur pour une vitesse de rotation donnée.

Applications pratiques – partie finalisée des travaux

- La courbe supérieure relie les points de puissance maximale pour différentes vitesses de rotation du moteur, elle est appelée « courbe enveloppe à pleine charge ».
- La courbe inférieure relie les points de puissances intermédiaires pour différentes vitesses de rotation, elle est appelée « courbe de puissances à charge partielle ». Il est possible de tracer de nombreuses « courbes à charges partielles » qui s'intercaleront entre puissance « nulle » et « l'enveloppe à pleine charge ». Mais celle-ci est particulière : elle relie des points de puissance à différentes vitesses, où la température d'échappement en sortie de culasse est d'environ 500°C. Pour chaque vitesse de rotation, tout point en dessous de cette courbe affichera une température d'échappement inférieure à 500°C, car la quantité de carburant brûlée sera insuffisante pour l'atteindre.
- Par contre, tout point compris entre les deux courbes correspondra à des températures supérieures à 500°C, où il sera donc possible d'injecter de l'huile végétale sans voir apparaître de problème de dépôts dus à une combustion incomplète.

Dans l'exemple ci-dessus, la puissance à 1800 tours par minutes, représente 71 % de la puissance maximale à cette même vitesse de rotation, ou autrement dit, à 71 % de charge. Ce qui signifie que le moteur ne fonctionnera à l'huile végétale que lorsque la puissance demandée au moteur dépassera 71 % du maximal de puissance à cette vitesse de rotation (à 1500 tr/mn, c'est à 65 % de la puissance maximale que le passage à l'huile s'effectuera).

Conclusion

L'utilisation des huiles végétales carburants nécessite parfois des modifications importantes sur les moteurs et les circuits d'alimentation.

La modification des moteurs à injection directe rend possible l'utilisation d'huiles végétales pures en substitution des fiouls. Il est aussi possible d'adapter des systèmes de bicarburant permettant l'utilisation d'une part significative d'huile végétale sans avoir à modifier les parties internes des moteurs. Il faut rappeler que le bon fonctionnement du moteur dépend également de la qualité du carburant.

Applications pratiques – partie finalisée des travaux



***Tracteurs avec moteur à injection directe modifié par le Cirad. Huile de tournesol, France, 2001
(Photo CIRAD)***



Tracteur Deutz à injection indirecte. Huile de colza, France, 1998 (Photo CIRAD)

Photos 10 : exemples de tracteurs agricoles modifiés ou adaptés par le Cirad pour utiliser des huiles végétales comme unique carburant. (Vaitilingom).

Applications pratiques – partie finalisée des travaux

Performances et pollution comparées entre huile végétale et fioul dans les moteurs diesels modifiés

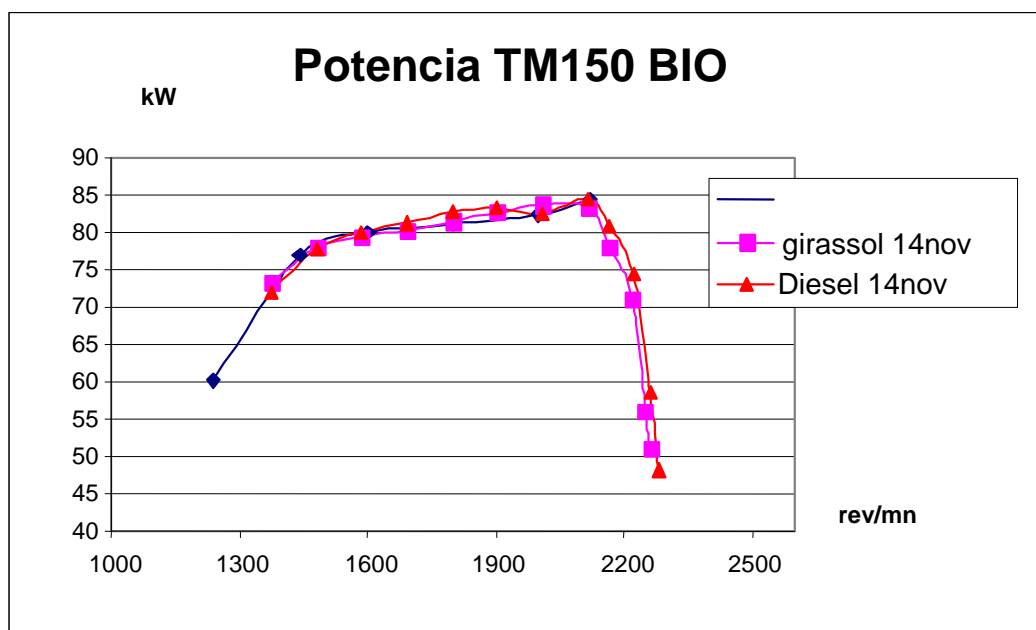
La quasi-totalité des tracteurs agricoles et des moteurs à poste fixe sont à injection directe. Il conviendra donc de les modifier pour qu'ils puissent utiliser de l'huile végétale naturelle comme biocarburant en circuit court d'autoconsommation.

L'impact de ces modifications sur les performances et la pollution des gaz d'échappement pourra être vérifiée avec d'autres huiles végétales, mais il devrait être très semblable aux résultats ci-dessous obtenus avec de l'huile de tournesol, issue d'un circuit court d'autoconsommation sur deux tracteurs New Holland et John Deere modifiés.

Par ailleurs, la longévité des moteurs est augmentée quand ils utilisent de l'huile végétale comme carburant et l'entretien est le même qu'avec le fioul. Ceci a été vérifié par plusieurs cotations effectuées selon la procédure CEC M-02-A-78 à la demande du Cirad.

Performances comparées.

Les puissances obtenues sont très proches. A puissance égale, on observe une augmentation de la consommation horaire de 7% en volume. Ceci est directement dû au plus faible pouvoir calorifique de l'huile de tournesol. Les rendements des moteurs sont améliorés avec le tournesol, comme le montrent les résultats suivants.

Puissance comparée entre fioul et huile de tournesol Tracteur New Holland TM150.

Applications pratiques – partie finalisée des travaux

Pollution comparée

Deux tracteurs modifiés et deux tracteurs non-modifiés sont comparés. Les résultats des deux tracteurs modifiés montrent une très bonne comparaison avec le fioul sur les polluants comme : CO, HC et NOx. Les tracteurs respectent les limites de polluants imposées par les normes européennes d'homologation définies par les directives de l'ISO 8178 et les facteurs de pondération du cycle C1.

Par ailleurs, le CO₂ rejeté par les deux tracteurs au tournesol ne participe pas à l'accroissement des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, car celui-ci sera remobilisé par la croissance de la plante, lors du cycle cultural suivant.

Emissions au couple maximal au régime correspondant

Résultats pour le tracteur New Holland TM 150

Tracteur N°	TM150 orig. fioul	TM150 BIO tournesol
<i>N tr/mn</i>	1350	1456
<i>Puissance. kW</i>	81.4	75.4
<i>Puissance ch</i>	110.6	102.4
<i>Consommation en carburant l/h</i>	23.4	24.0
<i>Température air admis °C</i>	21	22
<i>Température échappement °C</i>	383	435
<i>CO ppm</i>	1218	960
<i>CO₂ %</i>	8.6	8.0
<i>HC ppm</i>	53	82
<i>O₂ %</i>	9.1	10.0
<i>NOx ppm</i>	1530	1450
<i>Excès air</i>	0.79	0.93

Applications pratiques – partie finalisée des travaux

Emissions au couple maximal au régime correspondant

Résultats pour le tracteur John Deere 7710

Tracteur N°	JD 7710 orig. fioul	JD 7710 BIO tournesol
<i>N tr/mn</i>	1304	1302
<i>Puissance. kW</i>	110.2	102.2
<i>Puissance ch</i>	149.7	138.9
<i>Consommation en carburant l/h</i>	27.8	25.9
<i>Température air admis °C</i>	20	22
<i>Température échappement °C</i>	608	609
<i>CO ppm</i>	2143	692
<i>CO2 %</i>	10.1	9.7
<i>HC ppm</i>	53	59
<i>O2 %</i>	7.3	7.8
<i>NOx ppm</i>	1246	1324
<i>Excès air</i>	0.54	0.59

Conclusions

- Les huiles végétales pures sont utilisables dans les moteurs diesels à injection indirecte sans modifications de ces derniers.
- Par contre, les moteurs diesels à injection directe doivent être modifiés pour pouvoir utiliser les huiles végétales pures (palme, coco, colza, tournesol,...). Cependant, ces modifications n'empêchent pas l'usage du fioul. Les réservoirs des engins peuvent donc accepter de l'huile végétale, du fioul et tout mélange de ceux-ci.
- Les performances sont identiques et la pollution à l'échappement est en faveur des huiles végétales.
- Enfin la longévité des moteurs est accrue, quand ils utilisent les huiles végétales naturelles.

Applications pratiques – partie finalisée des travaux

3.3.2 Etude et mise en œuvre des modifications techniques de brûleurs.

Utilisation des HVP dans les brûleurs en résumé :

Les caractéristiques énergétiques des huiles végétales sont suffisamment proches de celles du fioul pour que l'on puisse s'attendre à une substitution aisée dans un brûleur.

	Gazole	Huile de coton	Huile de coprah
Densité (kg/dm ³) 20°	0.836	0.921	0.915
Pouvoir Calorifique Inférieur (kJ/kg)	43800	36400	37950
Indice de Cétane	50	34	41
Composition chimique (% masse)			
C	85.1	76.7	73.1
H	14.9	11.8	12.0
O	-	11.4	14.8
Formule globale	C ₂₁ H ₄₄	C _{17.94} H _{33.18} O ₂	C _{13.17} H ₂₆ O ₂

Caractéristiques physico-chimiques utiles à la prédiction des performances globales

Le problème de la nature physico-chimique différente des HVP vis à vis du fioul se retrouve pour les applications brûleurs : mauvaise combustion avec les réglages fioul et encrassement des parties "froides" des chaudières. Il est donc nécessaire de les adapter et/ou de les modifier.

Les brûleurs pour fioul "lourd" se prêtent mieux à l'usage des HVP (après quelques réglages et adaptations quand même). Mais ils n'existent, généralement, que pour des puissances allant de 300 kW à 1000 kW.

Des études et des mises en œuvre en conditions réelles de brûleurs de moyenne puissance (de 150 à 400 kW) modifiés pour les HVP ont eu lieu au Cirad depuis 2000. Les résultats très positifs ont montré qu'il est possible d'utiliser les huiles végétales pures. Aujourd'hui, quelques constructeurs commencent à s'engager sur ce créneau de puissance.

Applications pratiques – partie finalisée des travaux

En matière de petits brûleurs (< 50 kW), les offres sont plus nombreuses mais pas toujours fiables. Seuls quelques modèles ont fait leur preuve mais pour des puissances de 50 kW et plus. Dans la gamme 20 à 30 kW, ce qui correspond aux installations domestiques individuelles, il y a très peu d'offres sérieuses.

Principe de fonctionnement des brûleurs modernes :

Un jet pulvérisé de carburant est assuré grâce à une pompe volumétrique mécanique, il est accompagné d'un flux d'air de combustion contrôlé, respectant la quantité d'air nécessaire à la combustion complète de la quantité de carburant augmenté d'un excès d'air prédéterminé (3 à 5 % d'oxygène supplémentaire).

	Gazole ou FOD	Huile de coton	Huile de coprah
Pco pouvoir comburivore g.air/g.carb.	14.84	12.35	11.86

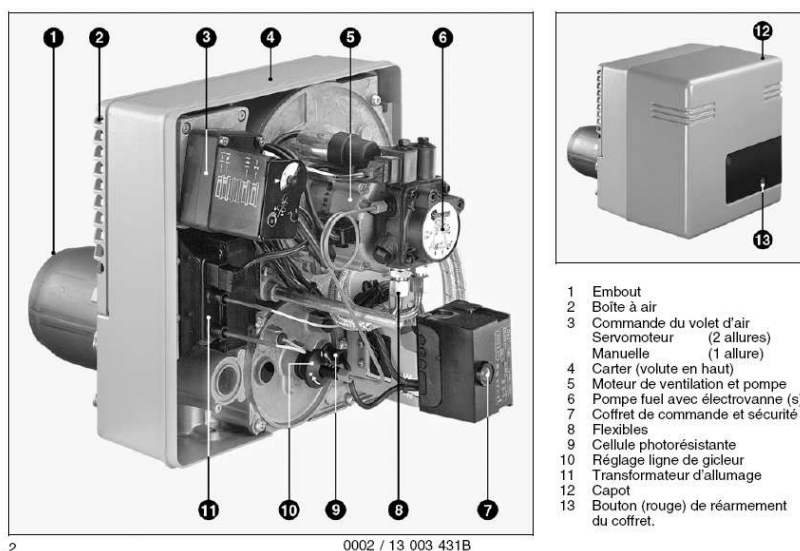
Pouvoirs comburivores comparés (sans excès d'air).

Le jet est assuré par un gicleur choisi pour son débit, à une pression déterminée et en fonction de la géométrie de la chambre de combustion.

Généralement, un moteur électrique entraîne la pompe de pression et le ventilateur d'air de combustion.

Un système de contrôle/commande assure le fonctionnement et les mises en sécurité du brûleur.

La plupart des brûleurs, en particulier les petits brûleurs domestiques, utilisent les mêmes organes (pompes, ventilateurs, boîtiers de contrôle) provenant de quelques équipementiers.



Document Cuenod

Applications pratiques – partie finalisée des travaux

Adaptations des brûleurs pour utiliser des HVP :

La viscosité des huiles végétales a une forte influence sur les équipements des brûleurs. Ceci a pour conséquence la nécessité de régler spécialement ces derniers, voire de changer certains éléments tels que les gicleurs. Mais, quelle que soit la taille du brûleur, il reste à vérifier, une fois les exigences technologiques remplies, si la combustion des huiles végétales est complète et quelles sont les performances globales et la pollution émise, comparées au fonctionnement gasoil.

Huile de Palme Brute et brûleurs : problèmes rencontrés et modifications à effectuer :

- Si l'on ne réchauffe pas le mélange combustible, l'allumage ne se produit pas dès une incorporation de 25 à 30 % d'huile de palme.
- Les mélanges jusqu'à 50/50 sont utilisables s'ils sont réchauffés à au moins 80 °C et homogénéisés, et si la pression de pulvérisation en sortie de pompe est remontée de 10-11 à 15-16 bars.
- Pour des mélanges de 50 à 75 % d'huile de palme, il est nécessaire de réchauffer le combustible à au moins 100°C. La pression de pulvérisation en sortie de pompe doit être remontée à 18-20 bars.
- Pour des taux supérieurs à 75 % et jusqu'à 90 % d'huile, il est possible d'obtenir un fonctionnement correct avec une température de mélange de 120°C et une pression de pulvérisation de 20 bars.
- A 100 % d'huile, la température doit être de 140°C et la pression de pulvérisation en sortie de pompe de 25 à 30 bars, sinon il n'y a pas allumage de la flamme.

Il apparaît généralement qu'après les premiers réglages (140 °C pour l'huile et 30 bars de pression), les essais à 100 % montrent :

- un démarrage totalement fiabilisé,
- des teneurs en polluants des fumées bien en-dessous des normes admises en Europe.

Avec cependant :

- un encrassement rapide du foyer,
- un « gouttage » de la tête de combustion.

Il faut alors :

- redéfinir un modèle de gicleur mieux adapté,
- re-concevoir le déflecteur d'air,
- redéfinir les réglages d'admission d'air.

Applications pratiques – partie finalisée des travaux

Les problèmes d'encrassement :

Sur la plupart des modèles de brûleurs, le déflecteur d'air (partie froide car ventilée en permanence) s'encrasse. La conséquence est que le détecteur de flamme (cellule

photoélectrique) finit par ne plus «apercevoir» de lumière et arrête le fonctionnement du brûleur par sécurité en absence de flamme. Pour exemple, ces arrêts se sont produits tous les 4 à 5 jours avec un mélange 50/50 colza/fioul (voir photos suivantes).



Déflecteur d'air après 4 jours à 50/50, tournesol/fioul (à droite : après nettoyage) photo Cirad

Par ailleurs, si trop de gouttelettes échappent à la combustion, on les retrouve sous forme de produits partiellement polymérisés sur les parois les plus « froides » des échangeurs de chaleur (les tubes de fumées, par exemple) ce qui va rapidement diminuer leur capacité d'échange. On retrouve ici, les problèmes rencontrés dans les chambres des moteurs diesels quand ils sont utilisés à des charges insuffisantes.

Applications pratiques – partie finalisée des travaux

Performances et pollution comparées entre fioul et Huiles végétales

Exemples de résultats obtenus :

Si tous les réglages et adaptations sont effectués, on obtient de bons résultats sur les performances et les émissions, aussi bien en petits brûleurs qu'en brûleurs de moyenne puissance.

Exemple 1 : brûleur Riello N10 (34 à 100 kW), 100% coton (essais Cirad 2007)

TYPE DE COMBUSTIBLE	100% coton	Fioul
CO ₂ %	8.3	9.3
CO mg/kWh	13	1
O ₂ %	9.9	8.3
NO mg/kWh	125	113
NO _x mg/kWh	130	118
SO ₂ ppm	0	74
TEMP. FUMES °C	705	662
TEMP. AMBIANTE °C	22	22

Pression en sortie de pompe : 18 bars. Température du mélange : 40°C

Exemple 2 : brûleur Cuenod C22.2, application en chauffage collectif, 100 % huile de colza (essais Cirad/Iribiom 1996).

Les essais ont porté sur le brûleur C22.2 (160 à 240 kW) modifié par le Cirad et Iribiom. Des locaux de la mairie d'Orléans ont été chauffés pendant 3 mois uniquement à l'huile de colza.

TYPE DE COMBUSTIBLE	100 % COLZA	Fioul
CO ₂ %	11.2	10.7
CO mg/kWh	4.8	1.3
O ₂ %	6.2	6.4
NO mg/kWh	71	93
NO _x mg/kWh	74	98
SO ₂ ppm	0	21
TEMP. FUMES °C	228	236
TEMP. AMBIANTE °C	23	19

Pression en sortie de pompe : 30 bars. Température de l'huile de colza : 140°C

Rappel : les limites selon EN267 sont : CO < 110 mg/kWh ; NO_x < 185 mg/kWh.

Applications pratiques – partie finalisée des travaux

Aperçu des brûleurs HVP disponibles sur le marché :

- Riello : propose des modèles adaptés aux HVP et garantis de 34 à 1000 kW.
<http://www.riello.fr>
- Raps Heizung (HPO) : propose un modèle de 40 à 90 kW
<http://www.raps-heizung.de>
- Kroll : propose des modèles de 50 à 200 kW
<http://www.kroll.de>



*Brûleur spécial Riello/Cirad ; 34 à 110 kW
Huile de coton brute, 2007. (photo Cirad)*

*Brûleur spécial huiles végétales Riello/Cirad ; 300 à 1100 kW
Huile de palme brute, Cameroun, 2007. (photo Cirad)*

Photo 11 : exemples de brûleurs adaptés pour les huiles végétales par le Cirad et RIELLO.

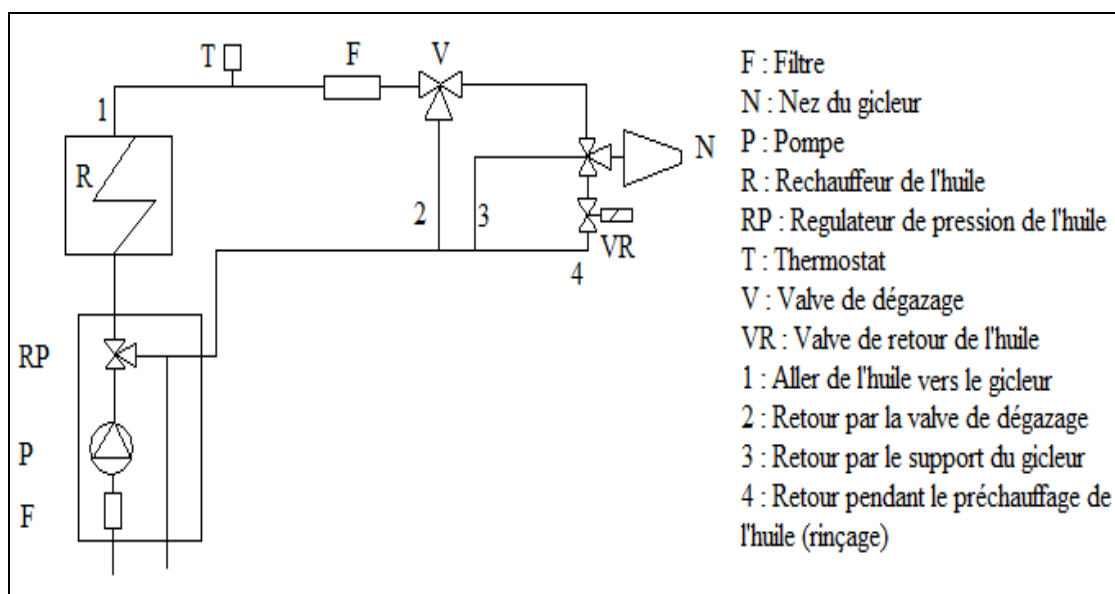


Figure 66 : schéma du circuit particulier des brûleurs RIELLO pour les huiles végétales

4. Projet de recherche.

Dans les années 80/90, avec l'équipe d'Orléans (devenue ECM/PRISME), nous nous sommes attachés « à faire fonctionner » les huiles végétales dans les moteurs ou les brûleurs. Nos travaux étaient orientés sur l'identification des paramètres influençant le fonctionnement. Avec un certain succès, nous avons pu définir des modifications techniques qui permettent l'usage d'huiles dans des conditions satisfaisantes. L'évolution des moteurs, liée aux limites d'émissions en vigueur et à venir, repoussent ces solutions à terme.

Aujourd'hui, il nous semble nécessaire de mieux détailler ce qui se passe avant la combustion. C'est dans ce sens que s'orientent nos travaux lesquels bénéficient des contributions que nous avons apportées jusqu'à présent.

4.1. Connaissance des processus physiques et chimiques lors de la combustion des huiles végétales.

Dans le cas des huiles végétales, on l'a vu précédemment, il est observé une distillation partielle suivie par une « polymérisation » des gouttelettes imbrûlées sur les parois des chambres de combustion, en-dessous d'une température moyenne d'environ 500°C. Ce qui rend réhébitoraire leur utilisation dans les diesels modernes à injection directe.

Une meilleure compréhension des phénomènes physiques et chimiques mis en jeu depuis l'injection jusqu'à la polymérisation sur les parois de la chambre de combustion, devrait permettre de proposer des moyens de favoriser les mécanismes de décomposition et de minimiser la polymérisation sur la paroi en influant, soit sur le carburant, soit sur la géométrie du moteur.

Ces travaux qui débutent, font l'objet d'une convention de coopération scientifique entre l'équipe ECM de l'Institut PRISME et l'UPR 42 du CIRAD.

Cette convention, établie fin 2009, se traduit aujourd'hui par la mise en commun de moyens opérationnels dans le cadre de recherches définies en commun.

Un premier doctorant, Augustin Zongo, a commencé ses travaux en septembre 2010³⁹. Il poursuit sa recherche en alternance auprès de l'équipe ECM, à Orléans et au sein de l'UPR 42 à Montpellier.

Il est inscrit en thèse dans le cadre d'une cotutelle entre le laboratoire de chimie et physique de l'environnement de l'université de Ouagadougou (Burkina Faso) et auprès de l'Université d'Orléans. Ses directeurs de thèse sont le Prof. Segda à Ouagadougou et le Prof. Higelin à Orléans. J'encadre ses travaux à Montpellier.

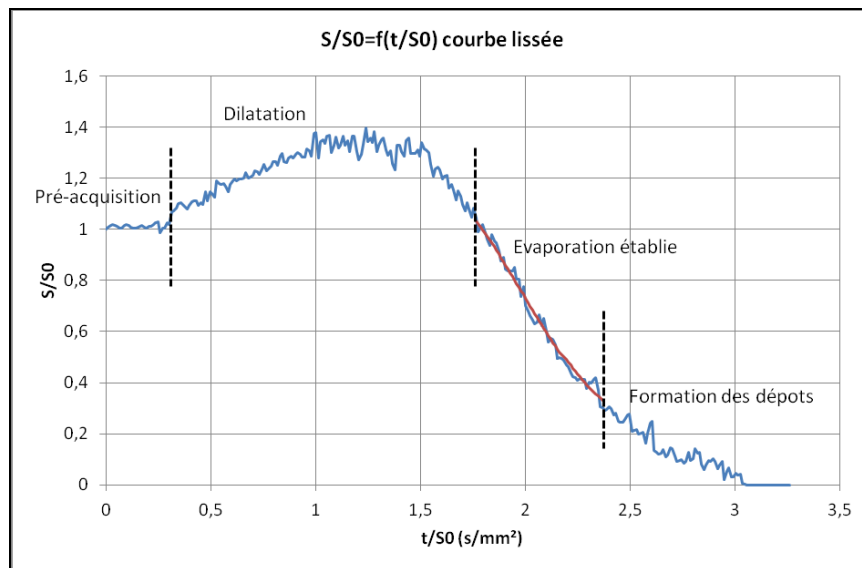
³⁹ Titre de la thèse : Etude des processus physiques et chimiques mis en jeu lors de la combustion des huiles végétales pures dans les moteurs diesel : Mécanismes de décomposition, de polymérisation et Adaptation d'un modèle 1D à la modélisation de la vaporisation.

Deux approches sont en cours de travaux et ont lieu simultanément. Chacune alimentant l'autre des données et informations acquises :

- La compréhension des mécanismes de dégradation des triglycérides,
- L'approche par la chimie précombustionnelle.

4.1.1 Compréhension des mécanismes de dégradation des triglycérides.

Il semble nécessaire de mieux comprendre ce qui se déroule lors de la phase transitoire de « dilatation » des gouttelettes, un rappel de la figure 18 est donné ci-dessous.



En ce qui concerne les coefficients d'évaporation, on a vu en effet que pour l'huile de coton, par exemple, et pour des températures inférieures à 773 K, le modèle quasi-stationnaire donne des résultats acceptables, alors que pour des températures supérieures à 773 K, la corrélation de Ranz et Marshall, tenant compte de l'influence de la convection et de la phase transitoire, donne une bonne prédiction des valeurs des coefficients d'évaporation.

La figure 67 indique l'évolution du gazole comparé à dix échantillons d'huile de colza différents, à 500°C (773 K).

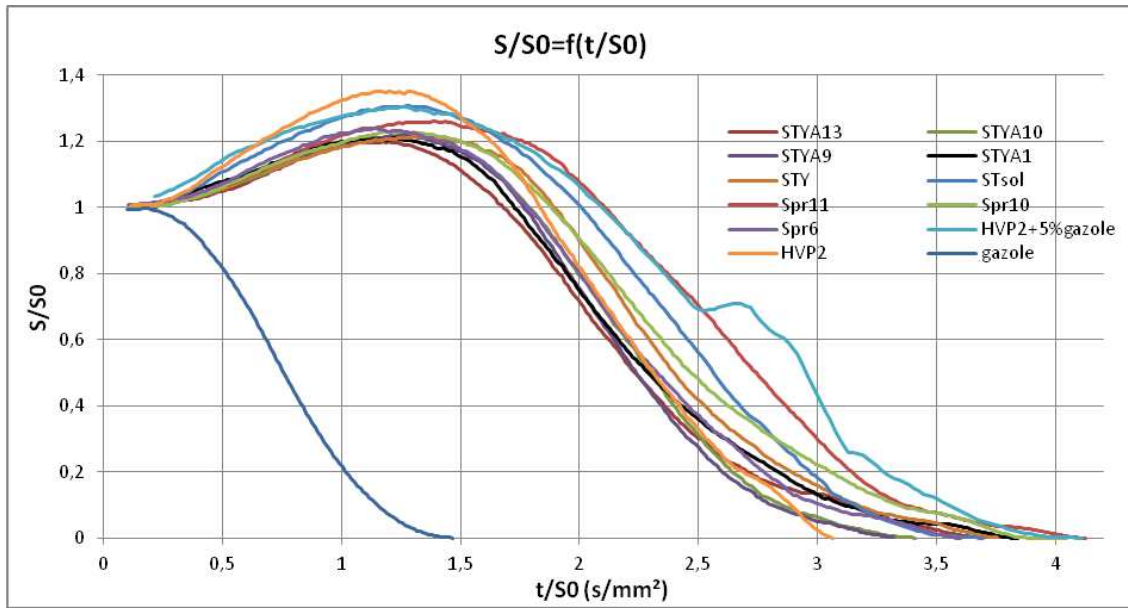


Figure 67 : évolution de la surface projetée normalisée en fonction du temps pour le gazole et dix échantillons d'huile de colza à une température de 500°C.

Ces mesures ont eu lieu grâce au dispositif illustré par la photo 12, où nous savons que les produits évaporés sont balayés par les gaz de combustion venant du bec bunsen, dont la teneur en O₂ est de 13 %.

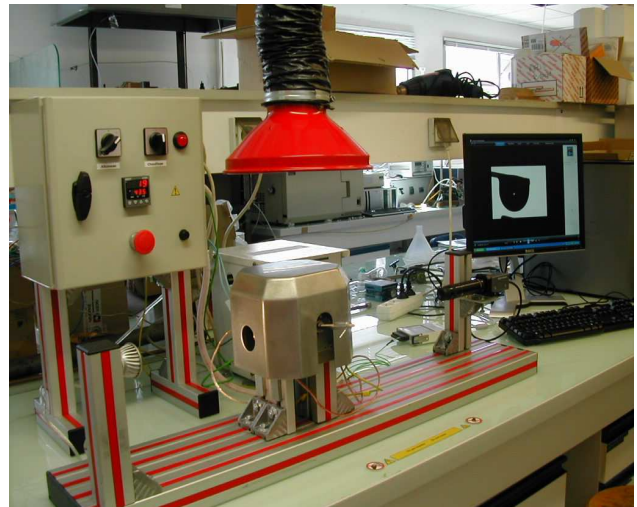


Photo 12 : dispositif d'évaporation dit « du tube » Photo 13 : dispositif « EVA »

Comme indiqué au paragraphe 3.1.5, nous avons fait évoluer le dispositif vers une chambre fermée à température et milieu contrôlés, baptisé : « EVA » photo 13.

Nous avons alors observé, en l'absence de balayage par un gaz vecteur, dès 400°C, une polymérisation de surface enfermant des gaz et provoquant ce que nous avons nommé « des œufs de crapauds ».

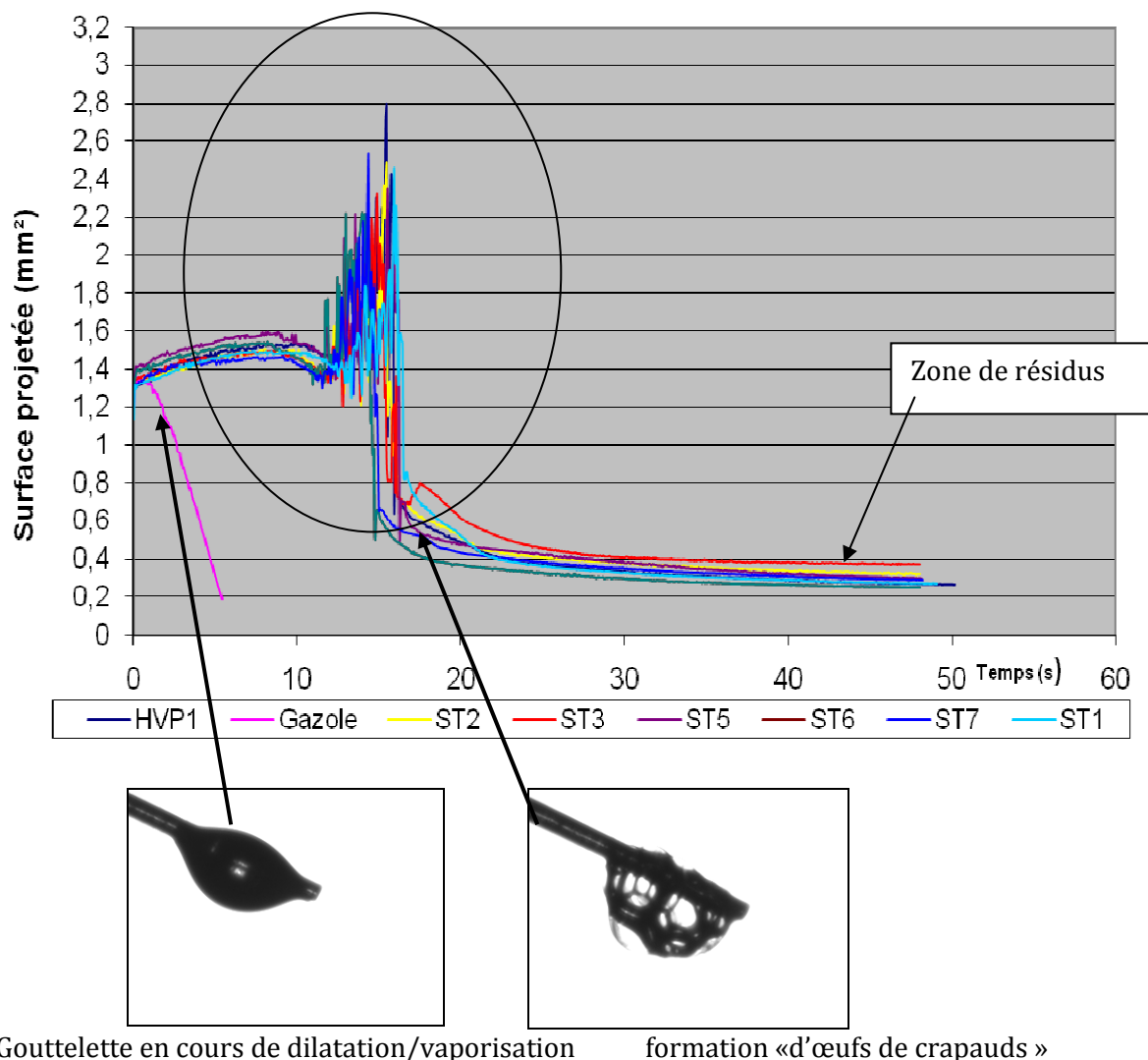


Figure 68: Illustration du phénomène de formation «d'œufs de crapauds» lors de la vaporisation sous air de gouttelettes d'huile de colza à 400°C (mêmes échantillons que dans la Fig. 67) avec le dispositif EVA.

Il n'y a plus balayage des produits évaporés. Il y a peut être combustion des premiers gaz, (ici la teneur en O_2 est de 21 %) ce qui provoquerait la polymérisation de la surface de l'huile. Ici, la « chimie » intervient même à des températures où les huiles végétales ne s'évaporent pas totalement (voir Fig. 20 et 22). Par ailleurs, dans « le tube », à 411°C les gouttelettes d'huiles présentent encore 2/3 de leur surface initiale après 60 secondes. Avec EVA, la surface projetée résiduelle est bien inférieure au 1/3 de la surface initiale. Ces « œufs de crapauds » seraient-ils favorables à la transformation rapide des gouttelettes d'huiles végétales ?

Il serait intéressant de connaître la température interne de la gouttelette pendant toute la phase transitoire, et la nature des premiers produits évaporés.

Nous avons donc orienté les travaux vers la mise au point d'un modèle qui permettrait d'établir les profils de température en tout point, depuis la surface jusqu'au centre de la gouttelette. Cette donnée donnerait accès aux valeurs des propriétés physiques pendant le déroulement de la phase transitoire et amènerait à proposer des mécanismes de vaporisation ou de dissociation des éléments de la macromolécule d'huile végétale.

4.1.2 Approche par la chimie précombustionnelle.

Lors de travaux de Nathalie Chirat [19], nous avons réalisé une étude de la chimie précombustionnelle au Southwest Research Institute SwRI (San Antonio – Texas).

N. Chirat avait établi un tableau des composés classés par ordre d'élution en CPG sur un TG modèle de colza à deux températures de la chambre CVCA sous une pression de 1,9 MPa.

Par ordre d'élution	400°C	300°C
Pentane ¹	b	-
?	f	-
Butanal	f	e
1-Héxène	d	f
Hexane	c	g
Tétrahydrofurane	c	-
Produit A + 2,5 dihydrofurane	d	f
Benzène	e	d
2 Méthyltétrahydrofurane	-	d
Alcane ramifié	h	e
1 - Heptène	e	-
Pentanal	e	d
Heptane	b	b
Toluène	g	f
1-Octène	d	-
Hexanal	e	d
Octane	b	-
Cétone insaturée	c	-
Ethylbenzène	-	c
Hexenal	b	-
2 - Heptanone	b	-
Heptanal	d	-
Heptenal	b	-
Isopropylbenzène	-	e
Méthyléthylbenzène ²	-	e
Méthyléthylbenzène ²	-	d
Méthyléthylbenzène ² + Octanal ³	c	h
Triméthylbenzène	-	f
Méthylisopropylbenzène	-	e
Ethylstyrène	-	e
Nonanal	e	-
Décanal	b	-

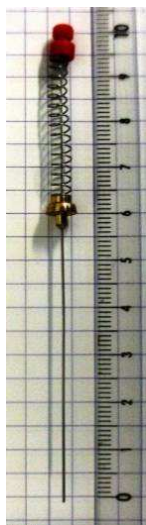
1 - a : < 0,1% ; b : 0,1 à 0,5% ; c : 0,5 à 1% ; d : 1 à 2% ; e : 2 à 5% ; f : 5 à 10% ; g : 10 à 20% ; h : >20%
 2 - Isomères de position ;
 3 - Le méthyléthylbenzène n'apparaît qu'à 300°C et 1,9 MPa.

L'étude concluait alors, qu'il restait à affiner l'identification des composés formés (utilisation de l'ionisation chimique au lieu de l'impact électronique, et utilisation d'une base de données de spectrométrie de masse informatisée).

Avec les données physico-chimiques dont on disposait, il était difficile de faire le lien entre la composition de la fraction de la phase gazeuse analysée et les délais d'inflammation mesurés. Un travail important restait à accomplir en vue de la caractérisation des composés identifiés issus de la chimie précombustionnelle.

Nous avons poursuivi ces approches pour notre projet de recherche et plus spécifiquement, nous cherchons à :

- Identifier les composés formés lors de la décomposition des huiles végétales,
- Elaborer les schémas cinétiques des composés formés lors de la décomposition des huiles végétales



La micro extraction sur phase solide (SPME pour Solid Phase Micro Extraction) est une technique permettant d'extraire des composés présents à l'état de trace dans un liquide ou un gaz. Il s'agit d'une fibre en silice fondue revêtue d'une phase stationnaire (polymère) sur laquelle viennent s'adsorber les composés. Cette fibre, fixée à un support amovible peut être rétractée ou sortie d'une aiguille, ce qui permet de contrôler le temps d'exposition de la phase stationnaire à l'échantillon.

L'étude des composés de volatilisation de l'huile de colza, par exemple, nécessite un dispositif pouvant porter l'huile à une température proche de son point d'ébullition, et au-delà. Le but était de garder les vapeurs d'huile dans une enceinte close, puis de récupérer les composés présents dans ces vapeurs. La température de l'huile doit être contrôlée de manière à mettre en évidence le changement de composition des vapeurs d'huile, le cas échéant. La température de l'environnement de la fibre SPME ne doit pas atteindre la température de dégradation de son revêtement, ni de désorption des composés.

La figure 69 présente le premier dispositif mis en œuvre pour cette approche.

1. Chauffe ballon
2. Huile de Colza
3. Thermocouple : huile de Colza
4. Porte fibre
5. Fibre SPME
6. Thermocouple : espace de tête
7. Bouchon
8. Afficheur électronique
9. Ballon à col haut
10. Support de porte fibre
11. Elévateur
12. Régulateur de puissance

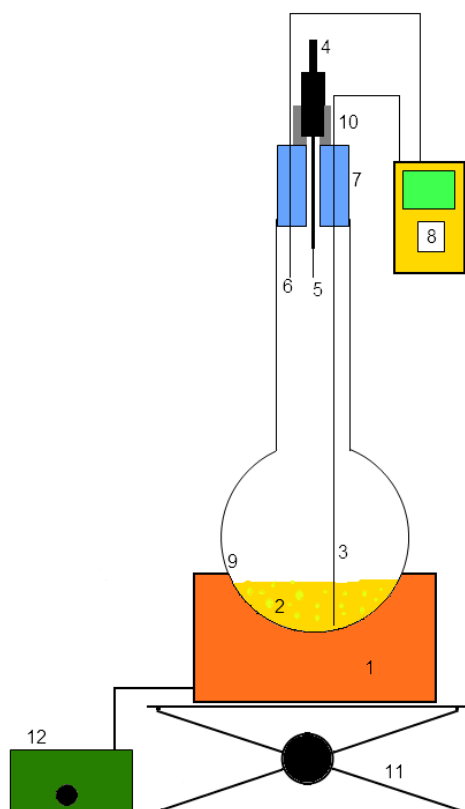


Figure 69 : Montage d'évaporation d'huile

Les premiers résultats montrent qu'à 320°C, les composés issus de l'oxydation des acides gras (aldéhydes, aldéhydes insaturés, alcanes, alcènes et alcools) sont élués en premier, suivis par l'acide oléique (majoritaire dans l'huile de colza) avant les monoglycérides autour de 20 min, puis les diglycérides, enfin

les triglycérides, molécules avec la plus grande masse molaire sont éluées à la fin, entre 30 et 40 min.

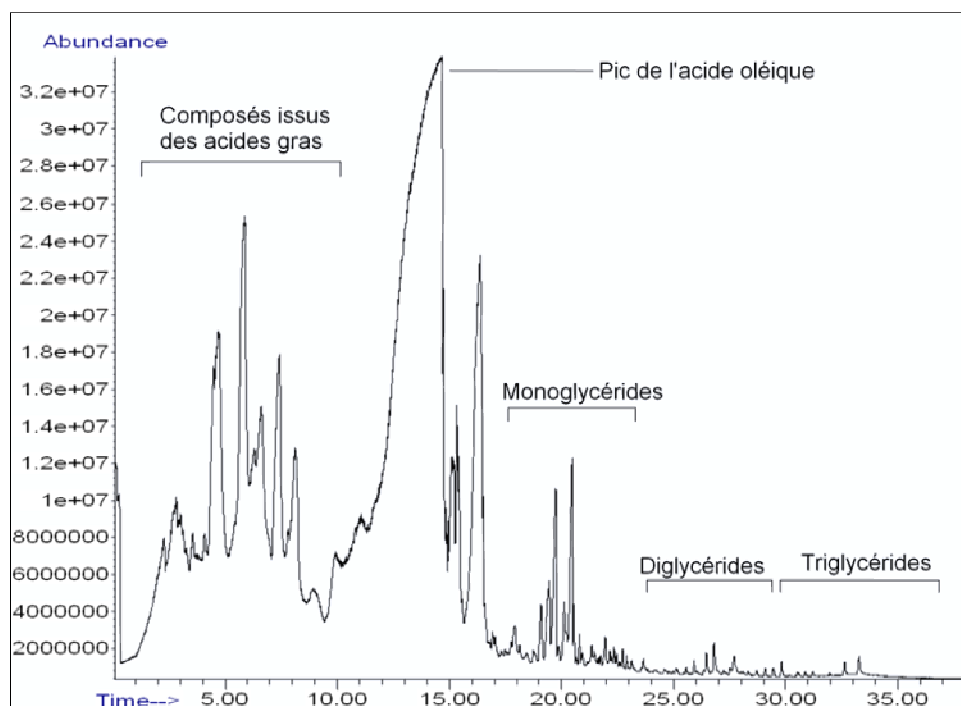


Figure 70 : chromatogramme de vapeurs d'huile de colza chauffées à 320°C [43].

Ce qui présente un grand intérêt, c'est que l'acide oléique est détecté en quantité significative par la fibre SPME dès un réchauffage de l'huile de colza à 240°C. Ceci signifie que la macromolécule, le triglycéride, a commencé sa décomposition. Il devient probable qu'une gouttelette introduite dans de l'air ambiant à 400°C produise des composés d'acides gras volatiles en quelques secondes, lesquels pouvant entrer en combustion. La poursuite des travaux d'identification est en cours.

4.2. Etude de formulations de carburants à base de biocarburants.

J'ai été amené à travailler sur différents produits combustibles qui provenaient soit de déchets industriels, soit de co-produits valorisables comme additifs ou carburants.

Ces actions se retrouvent dans la liste des contrats figurant dans le chapitre 6.

J'ai ainsi testé les comportements de :

- Dérivés d'acétate d'éthylène glycol, issus de fermentation de déchets organiques urbains,
- D'huiles de fritures usagées comme combustibles de brûleurs domestiques avec l'Université de Limerick en Irlande,
- L'incorporation de 15 % de vinasse issue de distillation alcoolique dans les fiouls lourds utilisés pour le séchage des pulpes de betteraves (Artenay, Loiret),
- Formulations éthanol/esters éthyliques d'huile végétale/gazole comme carburant Diesel pour les complexes agro-industriels africains,

- De la combustion de Bio-Ucf, qui sont des slurries ou mélanges d'eau/gazole/charbon végétal pulvérisé.

Je pense que les « formulations » destinées à substituer une part de plus en plus croissante de produits pétroliers, vont présenter un intérêt tout aussi croissant, dans et pour bien des pays à faibles ressources et totalement dépendants de l'importation de pétrole.

J'ai pu remarquer, par exemple, l'effet du diacétate d'éthylène glycol sur la réduction des NO_x, ou l'effet procétane des acides gras palmitiques et lauriques en mélanges dans des huiles végétales ou des fiouls.

Une collaboration s'est établie depuis 2009, sur l'étude de la combustion de poudres ligno-cellulosiques avec l'INRA de Montpellier (UMR 1208 IATE) et le CNRS de Poitiers (UPR 9028). Une première thèse a été soutenue en 2012⁴⁰ sur la caractérisation de la combustion isochore de poussières de biomasse.

C'est un nouveau champ de recherche qui s'ouvre ainsi, il couvrira par exemple le comportement de « formulations » liquides/liquides et liquides/solides. Un premier article a été publié en août 2012⁴¹.

⁴⁰ Marlène Paquet, 2012. Etude de l'explosion de poussières ultra-fines issues de la raffinerie sèche de la biomasse végétale, en vue d'applications à la propulsion. Thèse de doctorat. Institut Pprime, ENSMA Poitiers.

⁴¹ **B. Piriou., G. Vaitilingom, B. Veyssières, B. Cuq., X. Rouau.** Potential direct use of solid biomass in internal combustion engines. Progress in Energy and Combustion 39 (2013) 169-188..

5. Conclusions.

Le travail présenté dans ce manuscrit résume l'activité de recherche que j'ai menée sur les huiles végétales depuis les années 80. Le fil conducteur de ce travail est l'utilisation en tant que carburant des huiles végétales terrestres et marines. Ces travaux ont été menés parallèlement à d'autres, sur les gaz de gazogènes et l'alcool éthylique carburant pour moteurs diesels.

Interpellé par les divergences sur les résultats publiés, pourtant de très bonne qualité scientifique, sur le comportement des huiles végétales carburant, j'ai eu la chance de faire, quand il le fallait, les bonnes rencontres qui m'ont permis d'avancer en recherche. L'autre chance est d'avoir eu comme « lettre de mission », le développement de solutions locales de carburants de substitution pour les pays du Sud. Malgré les hauts et les bas de l'intérêt suscité par ces solutions, au gré des événements et des modes, j'ai pu maintenir une activité autour des huiles végétales carburant. Ces dernières ne représentent pas la solution au remplacement du pétrole pour les transports de la planète, mais le contexte actuel leur a ouvert les voies d'opportunité qui leur ont fait défaut depuis les essais de Rudolf Diesel en 1900. La situation des ressources pétrolières aisément disponibles ainsi que les perspectives à court terme de consommations mondiales de carburants, indiquent que l'accès aux carburants pétroliers se réduira, et que leur usage comme source liquide unique tendra à reculer dans bien des zones des pays en développement, mais également dans les pays émergents (BRICs : Brazil, India, China). Plusieurs pays du Sud se sont engagés dans les voies de substitution des produits pétroliers importés par des ressources locales, telles que les huiles de coprah, de coton ou de *jatropha curcas*.

Mais on peut tout aussi bien citer l'intérêt que représenteraient les huiles végétales pour l'agriculture française. En France, depuis la loi d'orientation agricole de 2006, la vente d'HVP (Huiles Végétales Pures) en vue de son utilisation comme carburant agricole a été autorisée à compter du 1er janvier 2007⁴². Le code des douanes a également été modifié et précise que les HVP comme carburant agricole dans les exploitations agricoles bénéficient d'une exonération de la taxe intérieure de consommation.

L'intérêt actuel suscité par le potentiel des lipides issus des microalgues à destination Biodiesel relance les travaux sur la caractérisation des huiles végétales.

Après m'être interrogé sur l'influence éventuelle des traitements, tel le raffinage, sur la qualité des huiles végétales en tant que carburant, je me suis intéressé à leur caractéristiques propres qui étaient du domaine de la lipochimie, et sans liens avec un usage énergétique en combustion. J'ai pu établir l'importance de la composition en acides gras en tant que critère d'aptitude carburant bien plus efficace que tout autre indice. Avec l'aide d'une équipe de qualité, j'ai pu établir que ce n'était pas la viscosité qui était responsable des problèmes de formation de dépôts dans les chambres de combustion. Bien qu'elle ait une importance significative dans les adaptations pratiques : inadéquation avec la porosité et la surface des filtres, détérioration mécanique des organes de pompage, perte de charge dans les circuits d'alimentation.

Nous avons pu montrer également, que les composés minoritaires des huiles, même à des taux élevés, avaient des effets négligeables sur l'inflammation des huiles.

L'aptitude à l'inflammation, mesurée par le délai d'inflammation, est dépendante de la présence des acides gras saturés, contenus dans une huile terrestre ou marine. Les acides gras monoinsaturés restant neutres dans ce processus. Surtout, il est apparu que

⁴² Il en est de même pour l'avitaillement des navires de pêche professionnelle

les acides gras polyinsaturés n'avaient pas d'effets mesurables sur l'inflammation. Mais qu'en revanche, ils étaient sujets à diverses formes de polymérisations. Depuis la siccation, l'oxydo-polymérisation et la polymérisation thermique.

L'incidence des aspects thermiques liés à la combustion dans les moteurs ou les brûleurs a été très bien démontrée par mes collègues de recherche. Ceci a permis de définir des adaptations et des modifications mécaniques qui ont fait l'objet de mises en œuvre concrètes et industrielles.

L'apport de l'évapo-stalagmométrie, méthode de caractérisation hors moteur, a eu toute son importance dans le classement en termes de qualité carburant des huiles végétales. Elle montre aujourd'hui son potentiel, quand il s'agit de microalgues ou de bio oils de seconde génération, en même temps qu'elle ouvre un champ d'investigation en chimie précombustionnelle. Les projets de recherche décrits plus haut utilisent ce dispositif.

Alors qu'avec les fiouls et gazoles on observe un délai physique, permettant l'atomisation du jet et la vaporisation du carburant, suivi d'un délai chimique permettant aux mécanismes de la combustion de se développer, avec les huiles végétales utilisées dans les mêmes conditions, on assiste à une simultanéité de la physique et de la chimie, les deux interagissant.

Références :

- [1] Bruwer, J. J., B. D. Boshoff, F. J. C. Hugo, L. M. DuPlessis, J. Fuls, C. Hawkins, A. N. VanderWalt, and A. Engelbert. 1981. The Utilization of sunflower seed oil as renewable fuel diesel engines. In *Agricultural Energy, Vol. 2, Biomass Energy/Crop Production*. ASAE Publication 4-81. St. Joseph, MI: ASAE.
- [2] Pryde E.H., 1982. Vegetable oil fuel standards. In : Proceedings of the International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels, Fargo, USA, August 1982, (ASAE Publication, 4-82), p.101-105. Saint-Joseph: ASAE.
- [3] Tahir AR., Lapp H.M., Buchanan L.C., 1982. Sunflower Oil as a Fuel for compression ignition engines. In : Proceedings of the International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels, Fargo, USA, August 1982, (ASAE Publication, 4-82), p.82-91. Saint-Joseph: ASAE.
- [4] Quick G. R., Wilson B. T., Woodmore P. J., 1982. Injector-fouling propensity of certain vegetable Oils and derivatives as fuels for Diesel engines. In : Proceedings of the International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels, Fargo, USA, August 1982, (ASAE Publication, 4-82), p.82-91. Saint-Joseph: ASAE.
- [5] Van Der Walt A.N., Hugo J.C., 1982. Attempts to prevent injector coking with sunflower oil by engine modifications and fuel additives. In : Proceedings of the International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels, Fargo, USA, August 1982, (ASAE Publication, 4-82), p.230-238 Saint-Joseph: ASAE.
- [6] Baldwin J.D.C., Klimkowski H., Keesey M.A, 1982. Fuel additives for vegetable oil-fueled compression ignition engines. In : Proceedings of the International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels, Fargo, USA, August 1982, (ASAE Publication, 4-82), p.224-229 Saint-Joseph: ASAE.
- [7] Kusy P.F., 1982. Transesterification of vegetable oils for fuels. In : Proceedings of the International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels, Fargo, USA, August 1982, (ASAE Publication, 4-82), p.127-137 Saint-Joseph: ASAE.
- [8] Pischinger G.H., Falcon AM., Soekmann R.W., Fernandes F.R., 1982. Methyl esters of plant oils as diesel fuels, either straight or in blends. In : Proceedings of the International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels, Fargo, USA, August 1982, (ASAE Publication, 4-82), p.198-208 Saint-Joseph: ASAE.
- [9] Gateau P., 1983/06E. Etude de la formation de dépôts au nez des injecteurs lors de l'utilisation de dérivés d'huiles végétales sur moteur à injection directe. Rueil Malmaison: I.F.P., 31227, 70p.
- [10] Gateau P., Guibet J.C., 1983/03. Utilisation des esters méthyliques comme combustibles diesel. Rueil Malmaison: I.F.P., 30975, 21p.

- [11] Guibet J.C., Montagne X., 1989. Utilisation des esters méthyliques ou Ethyliques d'huiles végétales comme carburants Diesel. Rueil Malmaison. I.F.P. 17p.
- [12] Ryan T.W., Callahan T.J., Dodge L.G., 1982. Characterization of vegetable oils for use as fuels in diesel engines. In : Proceedings of the International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels, Fargo, USA, August 1982, (ASAE Publication, 4-82), p.70-81 Saint-Joseph: ASAE.
- [13] Korus R.A, Mousetis T.L, Lloyd L., 1982. Polymerization of vegetable Oils. In : Proceedings of the International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels, Fargo, USA, August 1982, (ASAE Publication, 4-82), p.218-223 Saint-Joseph: ASAE.
- [14] Walter J., Aakre P., Derry J., 1982. The 1981 „Flower Power“ field testing program. Proceedings of the International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels, Fargo, USA, August 1982, (ASAE Publication, 4-82), p.384-393 Saint-Joseph: ASAE.
- [15] Martin et al., 1983. Possibilités d'emploi des diverses huiles tropicales dans les moteurs diesels : recensement et caractérisation. Paris: GERDAT -IRHO.
- [16] Thelliez M., 1986. Modélisation en aérothermochimie des moteurs, cours de DEA, Paris 6 -Orléans/ESEM.
- [17] Foucart T., 1985. Analyse factorielle. Programmation sur micro-ordinateur. Ed. MASSON.
- [18] Auld D.L, Beitis B.L, Peterson C.L, 1982. Production and fuel characteristics of vegetable oil from oilseed crops in the pacific northwest. In : Proceedings of the International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels, Fargo, USA, August 1982, (ASAE Publication, 4-82), p.92-97. Saint-Joseph: ASAE.
- [19] N. Chirat, 1996. *Etude de la qualité de biocarburants dérivés d'huiles végétales. Approche méthodologique.* Thèse de doctorat. Université de Montpellier 2.
- [20] G. Vaitilingom, 1992. Huiles végétales - biocombustible Diesel. Influence de la nature des huiles et en particulier de leur composition en acides gras sur la qualité-carburant. Thèse de doctorat. Université d'Orléans.
- [21] N. Chirat, D. Pioch, P. Lozano, J. Graille, G. Vaitilingom, A. Liennard. 1995. Qualité des carburants dérivés des huiles végétales : mise en place d'une stratégie d'étude. Publication interne Cirad.
- [22] Punch, 2005. Les acides gras. 25 pages, document internet.
- [23] G. Knothe, 2005. Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. Fuel Processing Technologies 86 (2005) p. 1059-1070. Elsevier.
- [24] Hasset DJ, Hasan R.A., 1982. Sunflower oil methyl ester as diesel fuel. In: Proceedings of the International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels, Fargo, USA, August 1982, (ASAE Publication, 4-82), p.230-238 Saint-Joseph: ASAE.

-
- [25] Heat Mechanic Division, 1980. Hexil Nitrate as cetane Improver. National Mechanical Engineering Research Institute, R.S.A.
- [26] Jalinier C., 1988. Etude comparative de l'inflammation et de la combustion de l'huile de coton et du gazole utilisés comme carburant dans un moteur à injection indirecte. Thèse de Doctorat, Université d'Orléans.
- [27] Higelin P., 1992. Huiles végétales biocombustible Diesel : Incidence des aspects thermiques liés au type de moteur sur la combustion. Thèse de Doctorat, Université d'Orléans.
- [28] Vaitilingom G., 1988. Modification de deux moteurs DUV ANT pour l'utilisation d'huile de coton comme carburant. Travaux effectués pour la Compagnie Française pour le Développement des fibres Textiles.
- [29] Scholl P., 1990. Versuche mit Gemischen von Rapsöl und Dieselkraftstoff mit verschiedenen motorischen Veränderungen.(motor Perkins 6.354-4). Rapport de fin d'études, ESEM/CEEMAT, 66 p.
- [30] T. Daho, 2008. *Contribution à l'étude des conditions optimales de combustion des huiles végétales dans les moteurs Diesel et sur les brûleurs : cas de l'huile de coton.* Thèse de doctorat. Université de Ouagadougou, Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement, Burkina Faso.
- [31] S. Sidibé, doctorat en cours, fin en 2011. *Contribution à l'étude des huiles végétales de coton et de jatropha curcas comme biocarburant dans les moteurs diesels à injection directe.* Université de Ouagadougou et Ecole Inter Etats 2IE. Burkina Faso.
- [32] Reitz R.D., Bracco F.B., 1979. On the dependence of spray angle and other spray parameters on nozzle design and operating conditions, SAE paper 790494,
- [33] Morin C., Chauveau C. and Gökalp I., Droplet vaporization characteristics of vegetable oil derived biofuels at high temperatures, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 21, Issue 1-3, pp.41-50, (2000).
- [34] Levendis YA, Atal A., Carlson J, Dunayevskiy Y, Vouros P., On the Survivability and Pyrosynthesis of PAH During Combustion of Pulverized Coal and Tire Crumb, Combustion and Flame 110:462-478 (1997)
- [35] Yilmaz N, Donaldson AB, Evidence of PAH production under lean combustion conditions, Fuel (2007), doi:10.1016/j.fuel.2007.02.015
- [36] Henning R.K., Jatropha curcas in Africa – an evaluation. Global Facilitation Unit for underutilized species, 2004.
- [37] Hiroyasu H., Arai M. Structures of fuel sprays in diesel engines, SAE paper 900475, (1990).
- [38] Elkotb M. M., Fuel atomization for spray modelling, Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 8, (1982)

- [39] Lefebvre A. H, Atomization and Sprays, Hemisphere Publishing (1989)
- [40] Monnot G., Feugier A., Le Bouc F., Mauss F., Meyer C., Perthuis E., De Soete G., La combustion dans les fours et les chaudières, Ed. Technip (1978)
- [41] Borghi R., Destriau M., La combustion et les flammes, Edit Technip, (1995)
- [42] Ejim CE, Fleck BA, Amirfazli A. Analytical study for atomization of biodiesels and their blends in a typical injector: Surface tension and viscosity effects. Fuel 2007;86:1534–44.
- [43] Lugagne E., Valette J., Vaitilingom G., Etude des composés issus de la dégradation de l'huile de colza dans un ballon sous haute température. Rapport interne Cirad, août 2012, 83 p.

6. Curriculum Vitae, publications, activités.

6.1. Curriculum Vitae

- Etat civil
- Situation professionnelle
- Formation
- Carrière
- Domaines de recherche

6.2. Publications et bibliographie

6.3. Activités d'enseignement

6.4. Activités administratives

- Gestion de contrats
- Autres activités d'intérêt général

6.1 Curriculum Vitae

Etat civil

Gilles VAITILINGOM
412, avenue de Montpellier
34270 Claret

né le : 20 septembre 1956 à Salon-de-Provence (13)
2 enfants

Docteur en énergétique
Qualifié MCF (section 62, 2009. N° 09262184364)

Situation professionnelle

Chercheur⁴³ au CIRAD (date d'entrée : 1^{er} mars 1982)

CIRAD (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement)

Statut : EPIC

Département Performances des systèmes de production et de transformation tropicaux (PERSYST).

Unité Propre de Recherche 42 « Biomasse énergie »

Avenue Agropolis - 34398 Montpellier cedex 5

Formation

1977 DEUG A (Math. Physique), Université d'Orsay Paris XI

1979 Maîtrise de Sciences et Techniques, Université d'Orléans

1981 Diplôme d'Ingénieur, ESEM (devenue Polytech'Orléans), Université d'Orléans

1982 *Recruté au CIRAD (01/03/82)*

1986 **DEA Conversion de l'Energie** – Université d'Orléans/Paris VI/ENSAM
Sujet de mémoire : « Les huiles végétales carburants des moteurs Diesel »

1992 **Thèse de Doctorat en énergétique** – Université d'Orléans

⁴³ Le statut des agents du Cirad est de droit privé. Il n'existe pas de *Directeurs de Recherche* et de *Chargés de Recherche* comme dans le EPST.

Titre : « Huiles végétales - biocombustible Diesel - Influence de la nature des huiles et en particulier de leur composition en acides gras sur la qualité-carburant ».

Directeur : Pr. J. Andrzejewski

Date : Soutenue publiquement le 10 janvier 1992 à Orléans

Jury : Dr. J.C. Guibet, Institut Français du Pétrole rapporteur
Pr. J. Martin, Université de Louvain rapporteur
Dr. A. Ahmed, Renault Rueil
Pr. M. Thelliez, Université Paris VI
Dr. A. Sapinski, Ecole Polytechnique de Varsovie
Dr. I. Gökalp, CNRS-LCSR Orléans

Carrière

1982 - 1989 : Ingénieur de recherche au Cirad (département Ceemat), chargé du développement de la bioénergie et de la métrologie.

1989 - 1991 : Adjoint scientifique à la division Recherche et Technologie du Ceemat

1992 - 1995 : Chef de l'Unité de Recherche Conception d'équipements, énergie et informatique (13 chercheurs et techniciens)

1996 - 1997 : Chef de l'équipe Procédés et Energie de l'Unité de Recherche Technologie et Procédés Agro Alimentaires (15 chercheurs et techniciens)

1998 - 2005 : Chercheur Cirad : équipe Physico-chimie et Bioénergie

2005 => Chercheur : UPR 42 « Biomasse Energie »

Domaines de recherche

Le Cirad mène avant tout des actions de recherche et développement. Je possède une formation de base en physique et sciences de l'ingénieur que je mets en œuvre lors de projets de recherche en coopération. Mais mon appartenance disciplinaire est l'énergétique et la conversion de l'énergie, base des travaux pour trois axes principaux :

- la caractérisation et l'étude des qualités des biocarburants en tant que combustibles,
- l'optimisation de la combustion des biocarburants,
- l'étude et la mise en œuvre de modifications techniques de moteurs et brûleurs.

2. Publications et bibliographie

Type	Nombre
Articles de revues internationales à comité de lecture	15 (5 en 1 ^{er} auteur) 2 en révision, 2 en préparation
Articles de revues internationales	4
Articles de revues nationales à comité de lecture	2
Chapitres d'ouvrage	4
Conférences internationales avec comité de lecture	21 (12 en 1 ^{er} auteur)
Posters conférences internationales	6
Conférences internationales sans comité de lecture	12
Communications nationales avec comité de lecture	2
Séminaires et enseignements internationaux	8

Brevet :

J. Andrzejewski, A. Charlet, P. Higelin, A. Sapinski, G. Vaitilingom
 « Procédé et dispositif de mesure de la vitesse d'évaporation et du délai d'inflammation d'un carburant liquide »,
 Brevet français : FR53763C

Brevet en cours d'examen INPI (dépôt 02/2012) :

B. Piriou, G. Vaitilingom, X. Rouau.
 « Carburant solide sous forme d'une poudre comprenant un constituant lignocellulosique ».

Enveloppe Soleau :

G. Vaitilingom
 « Modifications des moteurs DUVANT-CREPELLE de type xVJ3 ou xVJ3S pour pouvoir utiliser des corps gras comme carburant ». Septembre 1990.

Articles publiés dans des revues scientifiques internationales avec comité de lecture : (15)

- (1) **G. Vaitilingom**, 1983.
Utilisation des huiles végétales comme carburant des moteurs diesels. Oléagineux 38, n°8-9, p. 497-502. (*classé dans les revues à facteur d'impact IS : 0.18*)
- (2) C. Jalinier, J. Andrzejewski, **G. Vaitilingom**, A. Sapinski, 1990.
Détermination des conditions nécessaires au bon fonctionnement des moteurs diesels alimentés avec de l'huile de coton. Entropie, n° 14 8, p. 69-73.
- (3) **G. Vaitilingom**, Higelin P., Andrzejewski J., Sapinski A., 1992.
Influence du nitrate d'hexyle et de la température de l'air admis sur les délais d'inflammation des huiles végétales dans un moteur diesel. Entropie, n°161.
- (4) **G. Vaitilingom**, A. Liennard, 1997.
Various vegetable oils as fuel for Diesel engines and burners: Jatropha curcas particularities. Biofuels and industrial products from J. curcas. Ed. Technische Universität Graz, Austria. 1997. p 98-109.
- (5) **G. Vaitilingom**, Ch. Perilhon, A. Liennard, M. Gandon. 1998.
Development of rape seed oil burners for drying and heating. Industrial Crops and Products, Elsevier. Vol. 7, p. 273-279. *Facteur d'impact 2.469*
- (6) P. Lozano, D. Pioch, **G. Vaitilingom**, 1999.
Lubricant analysis: investigation of crankcase lubricant. Journal of Planar Chromatography, vol. 12, May-June 1999, p. 228-229. *Facteur d'impact 1.247*
- (7) P. Satgé de Caro, Z. Mouloungui, **G. Vaitilingom**, J. Ch. Berge, 2001
Interest of combining an additive with diesel-ethanol blends for a use in diesel engines. In FUEL 80 (2001) 565-574. *Facteur d'impact 3.248*.
- (8) D. Pioch, **G. Vaitilingom**, 2005.
Palm oil and derivatives: fuels or potential fuels? OCL vol. 12 n°2, March-April 2005.
- (9) **G. Vaitilingom**, 2006.
Utilisations énergétiques de l'huile de coton. Cahiers de l'Agriculture, vol. 15 n°1, janvier-février 2006, p. 144-149. (*classé dans les revues à facteur d'impact IS : 0.31*).
- (10) T. Daho, O. Sanogo, **G. Vaitilingom**, J. Koulidiati, P. Girard, 2007.
Caractérisation de diverses huiles végétales sur un brûleur adapté aux huiles végétales. Revue du CNRST, Sciences et Techniques, Burkina Faso, vol. 1 n°2, juillet-décembre 2007.
- (11) T. Daho, **G. Vaitilingom**, O. Sanogo, 2009.
Optimization of the combustion of blends of diesel and cottonseed oil in a non-modified boiler. FUEL 88 (2009) 1261-1268. *Facteur d'impact 3.248*
- (12) S. S. Sidibé, J. Blin, **G. Vaitilingom**, Y. Azoumah, 2010.
Use of crude filtered vegetable oil as a fuel in diesel engines. State of the art: literature review.. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 2748–2759. *Facteur d'impact 6.018*.

- (13) T. Daho, **G. Vaitilingom**, O. Sanogo, S. K. Ouiminga, B. G. Segda, J. Valette, P. Higelin, J. Koulidiati, 2012.
Model for predicting evaporation characteristics of vegetable oils droplets based on their fatty acid composition. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2012, 55 (11-12), 2864–2871 *Facteur d'impact* 2.407.
- (14) Daho T, **Vaitilingom G**, Sanogo O, Ouiminga SK, Segda BG, Valette J, Higelin P, Koulidiati J., 2012.
Study of droplet vaporization of various vegetable oils and blends of domestic fuel oil–cottonseed oil under different ambient temperature conditions. *J Biomass and Bioenergy* 46 (2012) 653–663. *Impact factor*: 3,646.
- (15) B. Piriou., **G. Vaitilingom**, B. Veyssières, B. Cuq., X. Rouau, 2012.
Potential direct use of solid biomass in internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science* 39 (2013) 169-188. *Facteur d'impact* 14.220.

Rédaction d'articles de revues internationales : (4)

- (1) **G. Vaitilingom**, 1983. Utilisation des huiles végétales comme carburant des moteurs diesels. *Machinisme Agricole Tropical*, n°82, p. 58- 65.
- (2) **G. Vaitilingom**, Y. Lemaitre, 1985. Gazogène : les économies envisageables avec un groupe électrogène dual-fuel, mythe ou réalité ? *Machinisme Agricole Tropical*, n.90, p. 83-86.
- (3) **G. Vaitilingom**, 1987. Essais d'un tracteur agricole alimenté avec de l'éthanol 95 additivé de 5 % de produit procétane. *Machinisme Agricole Tropical*, n°103-104, p.101-104.
- (4) D. Pioch, **G. Vaitilingom**, 1992. *Bioenergia* no CIRAD. *Contacto*, Vol 22, n. 4, p. 16-18, Brésil.

Articles de revues nationales à comité de lecture : (2)

- (1) **G. Vaitilingom**, Y. Agier; S. Lacour. Un carburant spécifique pour les engins agricoles : étude de quatre filières de production de biocarburants agricoles,(en ligne), *Revue SET*, 2012, no. 07, p. 54-61. Disponible sur : <URL :<http://www.set-revue.fr/un-carburant-specifique-pour-les-engins-agricoles-etude-de-quatre-filieres-de-production-de-biocarbu>>.
- (2) S. Lacour, Y. Galiègue, P. Guiscafré, **G. Vaitilingom**, P. Higelin. Analyses des consommations énergétiques des tracteurs en usage réel : application aux chantiers d'épandage,(en ligne), *Revue SET*, 2012, no. 07, p. 62-65. Disponible sur : <URL :<http://www.set-revue.fr/analyses-des-consommations-energetiques-des-tracteurs-en-usage-reel-application-aux-chantiers-depand>>.

Chapitre d'ouvrages : (4)

- (1) **G.Vaitilingom**, 1993. Protocoles d'essais destinés aux projets d'utilisation d'huile végétale comme biocarburant ; protocole national ; ADEME ; 40 p.

- (2) **G. Vaitilingom**, 1994. *Les biocarburants*, cours du CLESIA. 55 p. Société des Ingénieurs de l'Automobile.
- (3) **G. Vaitilingom**, 2007. Chapitre « Extraction, conditionnement et utilisations des huiles végétales pures carburant », p. 207-272. Guide Technique pour une utilisation énergétique des huiles végétales. Publication du Ministère des Affaires Etrangères/ADEME. 288 p.
- (4) **G. Vaitilingom**. 2008. Etude de l'huile de colza comme carburant agricole en circuit court. CIRAD/IUT-UPVD Perpignan, 90 p.

Communications en conférences internationales avec comité de lecture : (21)

- (1) **G. Vaitilingom**, 1983. Les huiles végétales carburant. Congresso scientifico sulle sostanze grasse. Venezia, 1-3 marzo.
- (2) M. Plançon, C. Esnouf, **G. Vaitilingom**, P. Girard, N. Shah, 1988. Long time test of an electricity generator coupled to a charcoal gasifier: automated operation of lean gas. International Journal of Agricultural Engineering Research, AgenG, Paris, 2-5 March.
- (3) P. Higelin, **G. Vaitilingom**, J. Andrzejewski, A. Sapinski, 1992. Evaporation and combustion aspects of vegetable oils use as fuel for I.C. engines. 2nd international Workshop on Fluid mechanics, Combustion, Emissions and Reliability in Reciprocating Engines; Capri. 6 p.
- (4) **G. Vaitilingom**, 1995. Heat and electricity from rice husks gasifier for small to medium mills. In International Conference on Grain Drying in Asia, FAO-ACIAR-GASGA, Bangkok, 17-20 October. 3 p.
- (5) **G. Vaitilingom**, A. Liennard, 1997. Various vegetable oils as fuel for Diesel and burners: *Jatropha curcas* particularities.. Biofuels and industrial products from *J. curcas*. International Symposium, Managua, 23-27 February.
- (6) A. El Hassan, **G. Vaitilingom**, 1999. Options techniques de transformation des sous-produits agricoles à des fins énergétiques. Symposium Biomasse Energie pour le Développement et l'Environnement. Abidjan, 29 nov.- 02 déc.
- (7) D. Pioch, N. Chirat, A. Liennard, T.W. Ryan, J.L. Vanhemelryck, **G. Vaitilingom**, 1999. Quality of Vegetable Oils as Fuel: Methodology for an Integrated Approach and Results. American Oil Chemist' Society, 90th annual meeting. Orlando, 9-12 May.
- (8) **G. Vaitilingom**, A. Liennard, P. Courty, 2000. Crude copra oil, a biofuel for diesel generators. More self-reliance and higher incomes. 1st World conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, 5-9 June 2000, Vol II, p. 1390-1393.
- (9) **G. Vaitilingom**, D. Pioch, 2000. Biolubricant and Biofuel from Sunflower Oil: Recent Results. Annual Meeting – Association for the Advancement of Industrial Crops & New Uses Council, USA, Saint Louis, Missouri, 15-17 October.
- (10) Pioch D., Chirat N., Liennard A., Lozano P., **Vaitilingom G.** 2004. Is soybean oil itself an acceptable diesel fuel? In : Moscardi Flavio (ed.), Hoffmann-Campo Clara Beatriz (ed.), Ferreira Saraiva Odilon (ed.), Galerani Paulo Roberto (ed.), Krzyzanowski Francisco Carlos (ed.), Carrão-Panizzi Mercedes Concordia (ed.). *Proceedings of the VII World soybean research conference, IV International soybean processing and utilization conference, III Congresso brasileiro de soja (Brazilian soybean congress), February 29 to March 5, 2004. Foz do Iguassu, PR, Brazil.* Londrina : EMBRAPA Soybean, p. 1028-1034. International Soybean

Processing and Utilization Conference. 4, 2004-02-29/2004-03-05, Foz do Iguassu, Brésil.

- (11) **G. Vaitilingom**, 2005. Experience with Biofuels in Rural Electrification. Workshop Toward increased use of Biofuels in Fiji. Forum Secretariat, Suva, 16-17 March.
- (12) **G. Vaitilingom**, 2005. Biofuel adapted Engine Design. Workshop Toward increased use of Biofuels in Fiji. Forum Secretariat, Suva, 16-17 March.
- (13) **G. Vaitilingom**, 2006. Biofuels fundamentals. Pacific Regional workshop Renewable Energy and Energy Efficiency, ADB. Suva, Fiji, 20-24 February.
- (14) **G. Vaitilingom**, 2006. Biofuels Technical options. Pacific Regional workshop Renewable Energy and Energy Efficiency, ADB. Suva, Fiji, 20-24 February.
- (15) **G. Vaitilingom**, P. Manapol, 2006. Biomass gasification. Pacific Regional workshop Renewable Energy and Energy Efficiency, ADB. Suva, Fiji, 20-24 February.
- (16) J. Cloin, **G. Vaitilingom**, 2008. Sustainable biofuels in the Pacific.. Pacific Regional Biofuels Workshop. FAO/IFAD/SPC/SOPAC, , Nadi, Fiji, 17-20 November 2008.
- (17) **G. Vaitilingom**, 2009. Technology updates on filtered crude coconut oil as biofuel. State of the Art of Coconut Processing and Market Prospects of Coconut Products in the Pacific Countries. APCC-SPC-ACIAR Roundtable workshop, Nadi, Fiji, 17-18 June 2009.
- (18) Y. Agier, **G. Vaitilingom**; L'agriculture française autonome en carburant demain, et pourquoi pas ? ECOTECHS'09 – Maîtrise de l'énergie à l'échelle de l'exploitation agricole : quelles perspectives technologiques ? Cemagref, site de recherche et d'expérimentation, 22-23 octobre 2009.
- (19) Y. Galiègue, S. Lacour, P. Guiscafré, **G. Vaitilingom**, P. Higelin, P. Gallet. Mise en place d'une méthode d'analyse des données et résultats d'expérimentation de travaux d'épandage de boues résiduelles et effluents organiques sur le terrain. ECOTECHS'09 – Maîtrise de l'énergie à l'échelle de l'exploitation agricole : quelles perspectives technologiques ? Cemagref, site de recherche et d'expérimentation, 22-23 octobre 2009
- (20) **G. Vaitilingom**, M.F.M. Nogueira, 2009. " Use of Vegetable Oils as Fuel in combustion Engines: Engineering options".COBEM 2009, 20th International Congress of Mechanical Engineering, Gramado-RS, Brésil, 15-20 November 2009.
- (21) S. Lacour, Y. Galiègue, P. Guiscafré, P. Gallet, **G. Vaitilingom**, M. Pradel. The contribution of field experiments to Life Cycle Assessment of agricultural works: application to spreading works. AgEng 2010, September 6-8.

Posters, conférences internationales : (6)

- (1) D. Pioch, P. Lozano, **G. Vaitilingom**, N. Chirat, 1994. CIRAD Bioénergie : une solution sur mesure adaptée à chaque situation. Colloque européen sur les biocarburants, Tours, 9-11 mai.
- (2) N. Chirat, D. Pioch, P. Lozano, J. Graille, **G. Vaitilingom**, A. Liennard, 1994. Influence du procédé de fabrication des carburants dérivés des huiles végétales sur les performances des moteurs (résumé). GINCEP, 1/12/94, Montpellier
- (3) A. Liennard, M. Gandon, C. Périlhon, **G. Vaitilingom**, 1996. Rape seed oil in burners. In : Third European symposium on industrial crops and products, Reims, 22-24 April.

- (4) **G. Vaitilingom**, A. Liennard, 1997. *Jatropha curcas* oil as fuel for Diesel and burners: Biofuels and industrial products from *J. curcas*. International Symposium, Managua, 23-27 February.
- (5) **G. Vaitilingom**, A. Liennard, P. Courty, 2000. Crude copra oil, a biofuel for diesel generators. More self-reliance and higher incomes. 1st World conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, 5-9 June 2000.
- (6) P. Langellier, **G. Vaitilingom**, 2007. Availability of tropical residues: the case study of sugar cane in the tropical world. ULCOS – SP7 , Aveiro seminar, Portugal, 21-22 September.

Communications en conférences internationales sans comité de lecture : (12)

- (1) P. Gislais, G. Antonini, M. Hallou, C. Skarvelakis, C. Mézerette, L. Vergnet, **G. Vaitilingom**, 1993. « The Bio-ultracarbofluid: a liquid fuel-oil substitution in boiler and diesel engines applications ». Biomass contractor meeting (EEC Joule research program), Athens, 1-2 June.
- (2) **G. Vaitilingom**, 1998. «Un aperçu des expériences françaises en biocarburants ». Colloque européen sur le présent et l'avenir des biocombustibles. Séville, 29-30 janvier.
- (3) D. Pioch, **G. Vaitilingom**, 1998. Energy Generation from Vegetable Oils; Scientific and Technical Aspects. 2nd International Workshop on Partnership for Technological and Industrial Development on Bioenergy. Recife, Brazil.
- (4) P. Courty, **G. Vaitilingom**, 2000. Copra bio-fuel, Decentralized Rural Electrification. Proceedings of ADB & IFAD Meetings -Funded Research Projects And Future Directions Of Coconut Industry. Apia, Samoa, 26th -30th June.
- (5) P. Courty, **G. Vaitilingom**, 2000. Copra bio-fuel, Financial and socio economical impacts. Proceedings of Pacific Power Association, 9th annual conference, Brisbane Australia, 21st-24th August.
- (6) **G. Vaitilingom**, P. Courty, 2002. «Crude Copra Biofuel for Diesel Engine. - National Coconut Bio-Fuel Rural Electrification and Development Workshop». Fidji, Suva, November 2002.
- (7) **G. Vaitilingom**, 2003. « The French Experience in Renewable Energy Technologies ». Soudan, University of Wad Medani and University of El Obeid, Delling, 9, 11 and 13 December.
- (8) Session chairman «Fuel Performance and Operation» in, The Utilisation of Waste and Recycled Cooking Oil in Domestic Boilers and Engines. European Seminar, Altener contract, Killaloe, Ireland, 5 September 2003.
- (9) **G. Vaitilingom**, 2007. «Uso de aceite vegetal como biocombustible». Congreso sobre biocombustibles y energias renovables. Peru, Universidad de La Molina – Lima, 17-19 de Mayo.
- (10) **G. Vaitilingom**, 2007. «Le cas particulier de l'utilisation des Huiles Végétales Pures dans les moteurs ». 1^{ère} Conférence internationale sur les enjeux et perspectives des biocarburants pour l'Afrique. Ouagadougou, Burkina Faso, 27-29 novembre.
- (11) **G. Vaitilingom**, A. Liennard, 2008. «AgroEnergy from North, Impact on the South». Workshop VANATROP, Non-food and energetic use of plants from Mediterranean and tropical areas international seminar, INRA/IRD/CIRAD. Montpellier, France, 22-24 October.

- (12) **G. Vaitilingom**, P. Lozano. Composition of fuels derived from the microalgae and their differences with those from the Biodiesel. 4th Seminar of European Customs Chemists, Helsinki, Finland, 2-4 June 2010.

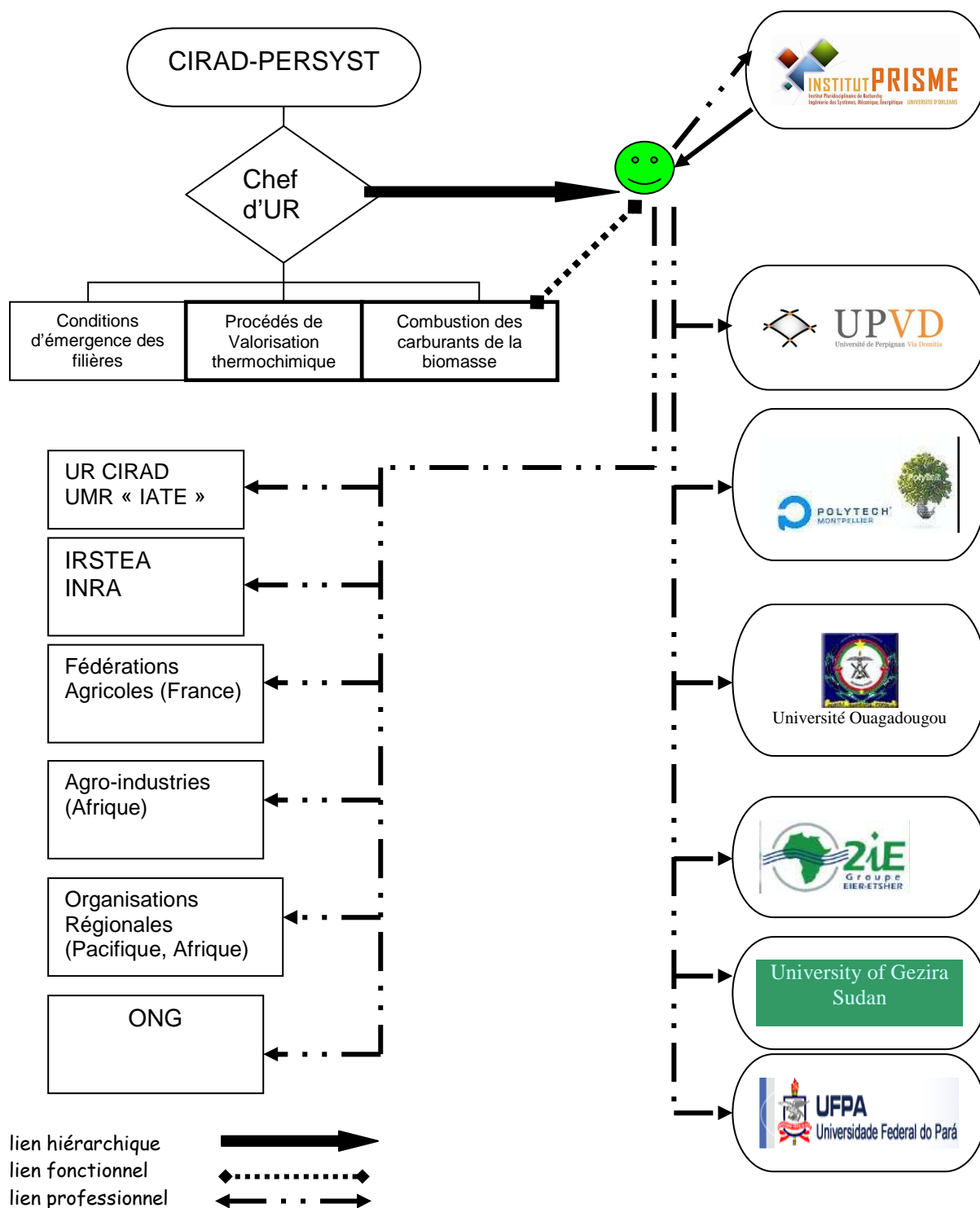
Communications en conférences nationales avec comité de lecture : (2)

- (1) N. Chirat, D. Pioch, P. Lozano, J. Graille, **G. Vaitilingom**, A. Liennard, 1995. Qualité des carburants dérivés d'huiles végétales. Mise en place d'une stratégie d'étude. Journées Chevreul de Nancy, novembre 95.
- (2) **G. Vaitilingom**, 2002. Crude Copra Biofuel for Diesel Engine. Evaluation of the Fiji demonstration Project. National Coconut Bio-Fuel Rural Electrification and Development workshop, Suva, Fiji, 8 November.

Séminaires et enseignements internationaux : (8)

- (1) **G. Vaitilingom**, 2003. Biofuels as new Sources of Energy. University of El Obeid, December 9, 2003, El Obeid, Sudan. Diaporama, 21 vues.
- (2) **G. Vaitilingom**, 2003. Biofuels as new Sources of Energy for Rural Areas. University of South Kordofan, December 11, 2003, Dalang, Sudan. Diaporama, 27 vues.
- (3) **G. Vaitilingom**, 2003. The French Experience in Renewable Energy Technologies. University of Gezira, December 13, Wad Medani, Sudan.
- (4) **G. Vaitilingom**, P. Rousset, 2005. Biocarburants : caractérisation et expérience du Cirad. In : Seminário Franco-brasileiro sobre Biodiesel: Experiências francesas e brasileiras na produção de biocombustíveis. ASPEF, São –Paulo, 4 de Julho 2005. Diaporama, 62 vues.
- (5) **G. Vaitilingom**, 2007. Aceite vegetal como biocombustible. Curso en Maestría Ingeniería Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible, UNAS Universidad Nacional Agraria de la Selva, 15 de abril 2007, Tingo María, Perú. Diaporama, 95 vues.
- (6) **G. Vaitilingom**, 2008. Biofuels Fundamentals. Master student Conference at USP University of South Pacific, 2 May 2008, Funafuti, Tuvalu. Diaporama, 85 vues.
- (7) **G. Vaitilingom**, 2009. Biofuels: Why and How ?. Postgraduate Conference at USP University of South Pacific, April 2009, Suva, Fiji. Diaporama, 91 vues.
- (8) **G. Vaitilingom**, 2009. Coconut Oil as Fuel for Diesel Engines. Conference at FIT Fiji Institute of Technology, Faculty of Applied Sciences (FASEMS), 15 June 2009, Suva, Fiji. Diaporama, 84 vues.

Organigramme fonctionnel au sein de l'Unité de Recherche



Implication dans des programmes de recherche européens et nationaux.

ANR PRECODD – ECODEFI : Eco conception et développement de méthodologies de fabrication de machines d'épandages (2006-2011).

Le projet porte sur l'éco-conception appliquée aux technologies de l'épandage des effluents organiques issus de l'industrie et de l'épuration des eaux urbaines. Ce qui représente 11 millions de tonnes de liquides chargés – boues –composts – granulés qui doivent pouvoir continuer à apparaître en positif dans le bilan environnemental de la filière, grâce à la valorisation agricole. D'autre part, ces technologies, réputées « sales », disposent de marges d'amélioration de leurs performances environnementales, permettant de réduire à la source les risques de pollution des agro-écosystèmes.

Résumé de la tâche N°4 « ECOEVALUATION : Consommation d'énergie et émissions ».

J'agis dans cette tâche en partenariat avec le CEMAGREF, la FNCUMA et Polytech'Orléans (P. Higelin).

Le calcul des flux énergétiques et de leurs conséquences en émissions de polluants de type NOx ou de gaz à effet de serre, ne peut se faire comme dans le domaine du transport, car les procédures s'appliquent au banc d'essai sur les moteurs seuls.

Il s'agit ainsi de définir des missions de travail, sortes de scénarios types, requérant l'intégration des différents facteurs de dégradation de la qualité d'épandage. Pour définir des « profils de mission », des systèmes d'enregistrement de type « boîte noire » seront installés par le CIRAD sur des engins choisis : à partir des informations stockées EPM/PRISME fournira les données nécessaires à l'évaluation des émissions de polluants et de gaz à effet de serre, et à la qualification de l'efficacité énergétique en condition réelle de travail.

ANR PNRB – SHAMASH Production de biocarburants lipidiques par des micro algues (2006-2010)

Ce projet a pour objectif de produire un biocarburant sous forme d'ester de méthyl à partir de micro algues autotrophes. Ces microorganismes peuvent accumuler des acides gras jusqu'à 80% de leur poids sec permettant d'envisager des rendements à l'hectare supérieurs d'un facteur 30 aux espèces oléagineuses terrestres (calculs théoriques). Jusqu'à présent, aucune équipe en France n'a encore travaillé sur l'utilisation de micro algues pour produire du carburant.

Résumé de la tâche CARACTERISATION DES BIOPRODUITS ;

Il s'agit d'établir les liens entre caractéristiques des huiles de micro algues et leur qualité en tant que biocarburants. L'objectif étant de proposer des recommandations de compositions en acides gras des huiles de micro algues à destination biocarburant et d'orienter les choix vers les souches de micro algues pouvant produire les « bons » lipides biocarburant.

Encadrements scientifiques.

Post-doc :

[1] B. Piriou, 2010-2012. Poudres ligno-cellulosiques comme carburant moteur.

Thèses :

[1] F. Mohamed Adam, 1990. *Valorisation des tiges de coton par la voie sèche*. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne.

Directeur : Prof. Gérard Antonini.

Encadrement à 30 %.

- [2] N. Eisa, 1993. *Les esters éthyliques d'huiles végétales comme carburant de substitution diesel pour les pays en voie de développement*. Thèse de doctorat, Université Technologique de Compiègne.
Directeur : Prof. Gérard Antonini.
Encadrement à 30 %.
- [3] P. Satgé-De Caro, 1995. *Synthèse d'additifs polyfonctionnels oxygénés pour le carburant diesel mixte gazole-éthanol*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse. Institut National Polytechnique de Toulouse.
Directeur : Prof. Michel Delmas.
Encadrement à 30 %.
- [4] N. Chirat, 1996. *Etude de la qualité de biocarburants dérivés d'huiles végétales. Approche méthodologique*. Thèse de doctorat. Université de Montpellier 2.
Directeur : Dr. Daniel Pioch, HDR.
Encadrement à 40 %.
- [5] A. El Hassan, 2000. *La réduction de la dépendance énergétique du Soudan. Contribution potentielle des résidus d'origine agricole*. Thèse de doctorat, ENSA Montpellier.
Directeur : Dr. Michel Benoit-Cattin, HDR.
Encadrement à 80 %.
- [6] A. O'Connell, 2005. *Recycled Vegetable Oils as Fuel*. PhD Thesis, University of Limerick, Ireland.
Directeur : Prof. Robin Howard-Hildige
Encadrement à 30 %.
- [7] T. Daho, 2008. *Contribution à l'étude des conditions optimales de combustion des huiles végétales dans les moteurs Diesel et les brûleurs : cas de l'huile de coton*. Université de Ouagadougou, Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement, Burkina Faso.
Directeur : Prof. Jean Koulidiati
Encadrement à 60 %.
- [8] S. Sidibé, 2011. *Contribution à l'étude des huiles de coton et de Jatropha comme biocarburants dans les moteurs diesels à injection directe*. Université de Ouagadougou et Ecole Inter Etats 2IE. Burkina Faso.
Directeur : Prof. Jean Koulidiati
Encadrement à 75 %.
- [9] A. Zongo, doctorat en cours, fin en 2013. *Mécanismes de décomposition, de polymérisation des huiles végétales et adaptation d'un modèle 1D à la modélisation de la vaporisation des gouttelettes*. Université de Ouagadougou, Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement. Cotutelle Université d'Orléans – Université de Ouagadougou, Burkina Faso.
Directeur Ouagadougou : Prof. Bila Segda
Directeur Orléans : Prof. Pascal Higelin
Encadrement prévu 60 %.

Membre de Jurys de thèse : 11 fois.

6.3 Activités d'enseignement

1984-1991 : Cours et TD « Carburants de substitution »
Ingénieurs Polytech Orléans (ex ESEM). 25 heures ETD par an.

1986-1988 : Cours et TD « Conversion de l'énergie »
DEA, Univ. Orléans/Paris VI. 20 heures ETD par an.

1997-2003 : Cours et TD « Biocarburants »
Ingénieurs ENSIA Massy. 9 heures ETD par an.

2004-2007 : Cours « Biocarburants »
Master EUREC/ENSMP. Master CEWB - ENSTIMAC. Ingénieurs
CNAM Paris ; IUT de Perpignan. Au total 36 heures ETD par an.

2007-2009 : Cours et TD « Biocarburants »
2^{ème} année Option Agronomie et option Génie de l'environnement,
IUT Perpignan Dépt. Génie Biologique. Interventions dans le cadre
d'une convention de coopération « Energie de la Biomasse ». Au
total 77 heures ETD par an.
Master EUREC/ENSMP. Ingénieurs ENSTIMAC. Au total 15 heures
ETD par an.

2009-2012 : Cours et TD « Biocarburants »
Master EUREC - ENSMP. Ingénieurs ENSTIMAC. Au total 20
heures ETD par an.

Cours « Biomasse Energie » en collaboration avec le LBE-INRA de
Narbonne. Ingénieurs POLYTECH Montpellier, spécialité ENR
Au total 15 heures équivalent TD.

6.4 Activités administratives

Gestion de contrats.

La soumission aux appels d'offres et l'exécution de contrats est une partie importante des activités dans un EPIC. Ne sont listés ci-dessous que les principaux contrats relatifs au domaine de recherche correspondants à mon appartenance disciplinaire.

Partenaire dans des contrats européens et nationaux de recherche :

- ETUDE DE LA VAPORISATION DE GOUTTELETTES DE BIOCARBURANTS
(CEE - JOULE / ADEME - 1990)
- ETUDE DU COMPORTEMENT DE L'HUILE DE POURGHÈRE *Jatropha curcas* DANS LE
COUPLE HUILE/MOTEUR

(CEE - STD2, 1990-1993)

- THE BIO-ULTRACARBO-FLUID : A LIQUID BIOFUEL-OIL SUBSTITUTE FOR BOILER AND DIESEL ENGINE
(EEC – JOULE, 1990-1993)
- "PRODUCTION OF FATTY ACID ESTERS USABLE AS FUEL BY FERMENTATION OF BIOMASS".
(EEC - FAIR PL, 1996-2000)
- ESTERIFIED WASTE COOKING OIL AS A SUMMER AND WINTER FUEL FOR VEHICLES AND HEATING BOILERS
(ALTENER/ADEME - 1997-1999)
- "ON BOARD EMISSION ANALYSIS SYSTEMS FOR URBAN BUSES", étude réalisée pour la STCP, Sociedade de Transportes Colectivos do Porto, Portugal.
(ADEME/CEE-ALTENER, 1998)
- "ETUDE DES DEMARRAGES A FROID SUR VEHICULE ALIMENTE PAR DES ESTERS D'HUILE DE FRITURE USAGEE".
(ADEME/CEE-ALTENER, 1999)
- ULCOS (Ultra Low CO₂ Steelmaking). Tâche dans le projet : POTENTIALITES DES AGRO-RESIDUS POUR LA PRODUCTION D'ACIER (ARCELOR).
(6^{ème} PCRD – 2004-2009).
- ECOEVALUATION : CONSOMMATION D'ENERGIE ET EMISSIONS
(ANR PRECODD – ECODEFI, 2006-2011).
- PRODUCTION DE BIOCARBURANTS LIPIDIQUES PAR DES MICRO ALGUES
(ANR PNRB – SHAMASH, 2006-2011).

Contrats gérés personnellement. Opérations menées en France sous contrats publics et privés : (tous ont fait l'objet de rapports intermédiaires et finaux)

- ESSAIS DE QUATRE HUILES TROPICALES DANS UN MOTEUR MONOCYLINDRE HATZ.
(AFME/IFP, 1983)
- UTILISATION D'HUILE DE COLZA BRUTE COMME UNIQUE CARBURANT D'UN TRACTEUR AGRICOLE
(ADEME – 1991)
- "MESURE DES POLLUANTS EMIS DANS LES GAZ D'ECHAPPEMENT LORS DE L'UTILISATION D'HUILE VEGETALE DANS UN MOTEUR AUTOMOBILE DIESEL"
(ADEME – 1993)
- "UTILISATION D'HUILE DE COLZA NON ESTERIFIEE COMME CARBURANT DES MOTEURS DIESELS AGRICOLES"
(ADEME – 1993)
- "UTILISATION D'HUILE DE COLZA NON ESTERIFIEE COMME CARBURANT D'UNE VOITURE DIESEL"
(ADEME - REGION LANGUEDOC-ROUSSILLON - 1993)

- "MESURE ET ANALYSE DES PERFORMANCES DE DEUX TRACTEURS UTILISANT DE L'HUILE DE COLZA COMME UNIQUE CARBURANT (opération FNCUMA/ADEME)" (ADEME- 1994)
- "APPUI TECHNIQUE ET SCIENTIFIQUE DANS LE CADRE DE L'OPERATION NATIONALE D'ESSAI D'HUILE DE COLZA COMME CARBURANT DE 7 TRACTEURS AGRICOLES" (FNCUMA - 1994)
- "SUIVI ET ANALYSE DE L'EXPERIMENTATION SUR UNE FLOTTE DE VEHICULES DE BIOCARBURANT EN MELANGE 50% DIESTER - 50% GAZOLE" (COOP. CHAMPAGNE-CEREALES - 1994)
- "ETUDE TECHNIQUE SUR LES UTILISATIONS POSSIBLES DE L'HUILE DEGOMMEE DE COLZA EN TANT QUE CARBURANT DIESEL" (AGRA 2000 – Picardie - 1994)
- "ETUDE DE L'INFLUENCE DE DIVERS PRODUITS SUR LA VAPORISATION DE GOUTTELETTES D'ESTER METHYLIQUE DE COLZA" (ONIDOL - 1994)
- "ETUDE DE LA REDUCTION DES EMISSIONS POLLUANTES A L'ECHAPPEMENT LORS DE L'USAGE D'HUILE VEGETALE DANS LES MOTEURS AUTOMOBILE DIESEL" (ADEME - 1996)
- "ETUDE ET REALISATION D'UN DEGOMMEUR DISCONTINU DE PETITE CAPACITE POUR HUILE DE COLZA" (ADEME - 1996)
- "ETUDE ET OPTIMISATION DE LA COMBUSTION D'HUILE DE COLZA DANS DES BRULEURS DE CHAUDIERES. OBJECTIF : SECHAGE ET CHAUFFAGE" (CRITT IRIBIOM/ADEME - 1995)
- "SUIVI ET ANALYSE DE L'EXPERIMENTATION SUR UNE FLOTTE DE VEHICULES DE BIOCARBURANT EN MELANGE 20% HUILE DE COLZA - 80% GAZOLE" (AGRA 2000 – Picardie - 1996)
- EXPERIMENTATION HUILE CARBURANT : 1300 HEURES A L'HUILE DE COLZA EN CONDITIONS REELLES D'UN TRACTEUR FIAT VITI 7086S A INJECTION DIRECTE MODIFIE. (FDCUMA Aude/SIDO/DRAF Languedoc-Roussillon – 1996)
- UTILISATION D'HUILE DE POURGHÈRE DANS UN MOTEUR DIESEL POUR LA PRODUCTION D'ENERGIE VILLAGEAISE (HATZ-France – 1997)
- VALIDATION DE LA QUALITE CARBURANT DE L'HUILE DE TOURNESOL. (ADEME/Région Languedoc Roussillon – 1997)
- "ETUDE DES PERFORMANCES ENERGETIQUES ET ENVIRONNEMENTALES DE LA COCOMBUSTION D'HUILE BRUTE DE COLZA, DE VINASSES ET DE FIOUL LOURD POUR LA PRODUCTION DE CHALEUR". (AGRICE/IRIBIOM 1998)
- "SUIVI DU FONCTIONNEMENT ET ANALYSES DES RESULTATS DE L'UTILISATION DE VINASSES DANS LES FOURS SECHEURS DE L'USINE D'ARTENAY". (Sté SDA, Sucrerie Distillerie d'Artenay, 1998)
- EXPERIMENTATION DU TRACTEUR RENAULT 110.54 A L'HUILE DE TOURNESOL A LA CUMA DE VILLALIER (Aude)

(FRCUMA L.R./ADEME – 1999)

- OPERATION DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE DE L'USAGE D'HUILE DE TOURNESOL SUR TRACTEURS AGRICOLES ET GROUPE ELECTROGENE.
(Région Midi Pyrénées/ARM, Midi Pyrénées, 2000-2003).
- PERSPECTIVES DE DEVELOPPEMENT DE L'UTILISATION DES HUILES VEGETALES PURES HORS USAGE BIOCARBURANT.
(ADEME Aquitaine / DEBAT, 2005-2006).
- ADAPTATIONS DES ENGIN D'ESPACES VERTS AUX BIOCARBURANTS ET BIOLUBRIFIANTS.
(VILLE DE LYON/ETESIA/KUBOTA EUROPE, 2006-2008).
- PROGRAMME EXPERIMENTAL REGIONAL HUILE VEGETALE PURE POUR L'AGRICULTURE.
(REGION RHONE ALPES, 2007-2010).
- AMELIORATION DES HUILES VEGETALES PURES (HVP) UTILISEES COMME COMBUSTIBLES EN PARTICULIER DANS LES MOTEURS EN REMPLACEMENT DU FIOUL.
(ADEME, 2010-2012).
- PROJET POWER POWDER.
(3BCAR, institut CARNOT, 2012-2013).

Contrats gérés personnellement. Opérations menées en Outremer sous contrats publics et privés : (tous ont fait l'objet de rapports intermédiaires et finaux)

- MISE EN ŒUVRE D'UN TRACTEUR DE 25 Ch. A ALCOOL CARBURANT.
(AFME/MOTEURGARO, Ile de la Réunion, 1983)
- EVALUATION DES PERFORMANCES DE TROIS TRACTEURS FONCTIONNANT AVEC DE L'ETHANOL 95.
(AFME/GIE MOTEURGARO - TOTAL, Ile de la Réunion, Ile Maurice, 1984-1986)
- ETUDE DES TRANSFORMATIONS DES MOTEURS A HUILE DE COTON DE L'USINE DE MOUNDOU.
(CFDT/COTONTCHAD, Tchad, 1988)
- ADAPTATIONS DES GROUPES ELECTROGENES DE LA HUICOMA A L'HUILE DE COTON A KOUTIALA.
(CFDT/CMDT, Mali, 1988)
- ETUDE DE FORMULATIONS ETHANOL/ESTERS ETHYLIQUES COMME CARBURANT POUR LES COMPLEXES AGROINDUSTRIELS AFRICAINS.
(CIRAD/TECHNISUCRE, Burkina Faso, 1992-1993)
- EXPERIMENTATION D'UN MOTEUR FONCTIONNANT A L'HUILE DE COPRAH
(Province des Iles Loyauté - CAAPO coop. d'Ouvéa - CTME / Nouvelle Calédonie - 1995)
- ETUDE ET REALISATION D'UN GROUPE ELECTROGENE DE 180 KVA ALIMENTE PAR DE L'HUILE DE COPRAH BRUTE POUR LA FOURNITURE EN ENERGIE DE L'USINE DE DESSALEMENT D'EAU DE MER D'OUVEA.
(Mairie d'Ouvéa/Province des Iles Loyauté - Nouvelle Calédonie, 1998)

- PETITE MOTOPOMPE DIESEL EN AFRIQUE: ETUDE DE LA MODIFICATION POUR L'UTILISATION D'HUILES VEGETALES COMME CARBURANT
(Constructeur : HATZ Allemagne et HATZ France, 1998)
- MISE EN ŒUVRE DE DEUX GROUPES ELECTROGENES A HUILE DE COPRAH POUR L'ELECTRIFICATION DE QUATRE VILLAGES AUX ILES FIDJI
(SPC/AFD, 1999-2001)
- IDENTIFICATION DE PROJETS D'UTILISATION D'HUILE DE POURGHÈRE (*jatropha curcas*) COMME BIOCARBURANT.
(STICHTING SIONSHULP, Nicaragua, 2002)
- IDENTIFICATION DE PROJETS D'UTILISATION D'HUILE DE COPRAH COMME BIOCARBURANT.
(PPA/UE/Ambassade de France, Etats Fédérés de Micronésie, 2002)
- APPUI TECHNIQUE A LA RECHERCHE DE SOLUTIONS AU PROBLEME DE MANQUE DE CARBURANT DES UNITES DE PRODUCTION AGRICOLE.
(PASEA/Ambassade de France, Cuba, 2002)
- MODIFICATION ET MISE EN ŒUVRE DE DEUX TRACTEURS AGRICOLES FONCTIONNANT A L'HUILE DE TOURNESOL.
(PASEA/Ambassade de France, Cuba, 2003)
- MISE EN ŒUVRE D'UN GROUPE ELECTROGENE 300 KVA A HUILE DE COPRAH DANS LA CENTRALE ELECTRIQUE D'OUVEA.
(ENERCAL/PIL, Nouvelle Calédonie, 2003)
- FEASABILITY STUDY INTO THE USE OF COCONUT OIL IN ELECTRIC POWER GENERATION.
(UNDP/SOPAC, Samoa, 2005).
- EVALUATION DE L'UTILISATION D'HUILE DE PALME BRUTE COMME CARBURANT.
(GROUPE SIFCA, Côte d'Ivoire, 2006).
- EVALUATION DE L'UTILISATION D'HUILE DE PALME BRUTE COMME CARBURANT DIESEL ET COMBUSTIBLE DES SECHOIRS A CAOUTCHOUC.
(GROUPE SOCFINCO, Cameroun, 2006).
- FEASIBILITY STUDY – RENEWABLE ENERGY PROJECTS – GENERATION COMPONENT.
(WORLD BANK/SKM, Iles Salomon, 2007).
- DEVELOPPEMENT DE L'UTILISATION D'HUILE DE PALME BRUTE COMME CARBURANT.
(GROUPE SOCFIN, Côte d'Ivoire, 2007-2010).
- APPUI A LA PRODUCTION ET A L'UTILISATION D'HUILE DE JATROPHA DANS LES MOTEURS DIESELS EN MILIEU RURAL AU MALI ET AU BENIN.
(GERES, 2010-2013).

Autres activités d'intérêt général.

Gestion de la recherche :

1989-1991 : Adjoint scientifique à la division Recherche et Technologie.

- 1992-1995 : Chef de l'Unité de Recherche Conception d'équipements, énergie et informatique (13 chercheurs et techniciens).
1996-1997 : Chef de l'équipe Procédés et Energie de l'Unité de Recherche Technologie et Procédés (15 chercheurs et techniciens).

Activités d'expertise les plus marquantes :

- 1987-1990 : membre du "gasifier roundtable - Panel of expert". FAO. Rome.
1992 : membre du "Panel of Expert on Agricultural Engineering". FAO. Rome.
1992 : Actions Intégrées Franco-Allemandes. PROCOPE, ITL. Leipzig.
1995 : membre du comité de réflexion "cultures industrielles et biocarburants" ESPACES POUR DEMAIN.
1997 : membre de la commission de travail française sur l'énergie alternative ALTENER THERMIE DG XVII
1995 - 1997 : expertise de projets déposés dans le cadre de l'appel d'offre AGRICE.
1996-2005 : membre du Conseil d'Administration du Pôle Carnot Languedoc-Roussillon.
2003 : participant et contributeur au groupe de travail « Plan climat 2003 », Mission interministérielle de l'effet de serre (MIES).
2006 -> : membre du Groupe de travail Carburant-combustible, « Transferts LR » (Conseil Régional – transfert de technologie et de savoir-faire innovants en Languedoc Roussillon).

Je suis membre adhérent à la Société Française de Thermique en tant que chercheur de l'UPR 42,

ANNEXE

Publication :

Daho T, Vaitilingom G, Sanogo O, Ouiminga SK, Segda BG, Valette J, Higelin P, Koulidiati J. Model for predicting evaporation characteristics of vegetable oils droplets based on their fatty acid composition. Int J Heat and Mass Transfer 2012;55: 2864–71.



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

International Journal of Heat and Mass Transfer

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijhmt

Model for predicting evaporation characteristics of vegetable oils droplets based on their fatty acid composition

T. Daho^{a,*}, G. Vaitilingom^b, O. Sanogo^c, S.K. Ouiminga^a, B.G. Segda^a, J. Valette^b, P. Higelin^d, J. Kouliadiati^a^a LPCF, Département de physique, Université de Ouagadougou, 03 BP 7021, Burkina Faso^b CIRAD, Unité de recherche Biomasse-Energie, TA B-42/16, 73 rue JF Breton, 34398 Montpellier, France^c IRSAT, Centre National de la Recherche, Scientifique et Technique, 03 BP 7047 Ouagadougou, Burkina Faso^d PRISME/ECM, Polytech'Orléans, 8 rue Léonard de Vinci, 45072 Orléans, Cedex 2, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 19 October 2011

Received in revised form 25 January 2012

Accepted 25 January 2012

Keywords:

Cottonseed oil

Diesel fuel

Droplet

Evaporation

Fatty acids

ABSTRACT

In this work, a model for predicting evaporation characteristics (constant of evaporation and evaporation time) of cottonseed oil and diesel fuel has been developed and validated experimentally in the temperature range of 684–917 K under atmospheric pressure.

The experimental study is based on the fibre-suspended droplet evaporation technique. The theoretical model for predicting evaporation characteristics is based on the determination of transport properties and thermodynamic properties of different phases of cottonseed oil using the properties of its predominant fatty acids (linoleic, oleic and palmitic). Results show that taking into account convection in the quasi-steady model by the correlation of Ranz and Marshall is enough to give a good prediction of the constant of evaporation of diesel fuel in the studied temperature range. For cottonseed oil, the quasi-steady model gives a good prediction for temperatures from 684 K to 773 K while for temperatures from 773 K to 917 K, it is necessary to take into account the convection and the influence of the heating period of the droplet for a good prediction of the constant of evaporation. For the duration of heating and evaporation time, the model gives a rather good prediction for cottonseed oil for the temperature range from 840 K to 917 K.

© 2012 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The use of vegetable oils and their derivatives in diesel engines or burners has gained a renewed of interest in recent years related to economic, (fluctuating of costs of fossil fuels), environmental and strategic considerations. In particular, in developing countries, the use of pure vegetable oils in specific applications (power generation in rural areas, irrigation, etc.) can be a real factor for socio-economic development. But, given certain characteristics of vegetable oils (physical and chemical nature: high viscosity, low surface tension, fatty acid composition ...), their use may lead to the formation of carbon deposits [1–4] due to their thermal decomposition and polymerization under certain temperature conditions [5,6].

The control of the mechanisms leading to the formation of these deposits needs to study each of the phenomena involved: atomization, evaporation, decomposition, combustion. In general, it is necessary to study them separately. This work focuses on droplets evaporation of pure vegetable oils and diesel fuel. One approach

used to study the evaporation process in a spray is the study of single droplet evaporation. This approach has been largely used for hydrocarbons compounds evaporation [7–11]. Studies on the evaporation or combustion of droplets of vegetable oils derivatives (esters) or bio-oils are also reported in the literature [7,12–15]. These studies show that methyl or ethyl esters of vegetable oil evaporate at low temperature (below 600 K) [7] and their evaporation characteristics can be well predicted with quasi-steady model corrected by taking into account convective effects [7,13]. In contrast, studies on the evaporation or combustion of droplets of pure vegetable oils are rarer. Investigations on the evaporation of pure vegetable oils are mostly experimental. These investigations have described the mechanism of evaporation of vegetable oils and have determined their characteristics of evaporation but none have proposed a model to calculate these characteristics [1,16–18].

The objective of this work is to propose an approach to predict the evaporation characteristics of vegetable oils. For that, an existing theoretical model has been used and compared with experimental results. One difficulty in determining the theoretical constants of evaporation lies in the knowledge of thermodynamic and transport properties. The approach used here to determine transport and thermodynamic properties of liquid and gaseous

* Corresponding author. Tel.: +226 70 46 26 53; fax: +226 50 39 33 37.
E-mail address: tizane_daho@yahoo.fr (T. Daho).

Nomenclature

B_M	mass transfer number	R	universal ideal gas constant
B_T	thermal transfer number	T	temperature
C_p	constant pressure specific heat	T_c	critical temperature
D	binary diffusion coefficient	T_{ebf}	normal boiling point of the fuel
d	droplet diameter	T_r	reference temperature
d_0	droplet initial diameter	t	time
g	intensity of gravity	t_1	heating time of the droplet
Gr	Grashof number	t_2	evaporation time during the steady phase
h	heat transfer coefficient by natural convection	t_{ev}	lifetime of the droplet
k_0	Boltzmann constant	Y	mass fraction
K	constant of evaporation about quasi-steady model	Y_r	reference mass fraction
K_c	constant of evaporation taking into account only the natural convection		
K_{cc}	constant of evaporation taking into account the natural convection and the influence of the heating phase of the droplet		
K_x	K_c or K_{cc} for the calculation of total time of evaporation		
Le	Lewis number		
L_v	latent heat of vaporization		
M	molecular weight		
\dot{m}	fuel mass		
\dot{m}	mass flow rate		
Nu	Nusselt number		
P	atmospheric pressure		
P_c	critical pressure		
Pr	Prandtl number		
P_{sat}	saturation vapor pressure		
r	radial coordinate		

Greek symbols

β	coefficient of thermal expansion
μ	dynamic viscosity
ρ	density
λ	thermal conductivity
Ω_v	collision integral for viscosity
ε	Lennard–Jones energy
θ	collision diameter

Subscripts

∞	relative to the atmosphere
A	relative to air
f	relative to the fuel
fg	relative to the gas phase of the fuel
fl	relative to liquid fuel
g	relative to the gas phase
s	relative to the surface of the droplet

phases of a cottonseed oil is based on the properties of its predominant fatty acids (linoleic, oleic and palmitic). Indeed, vegetable oils have each their characteristics and their behavior is largely determined by their fatty acid composition [16]. For prediction of evaporation characteristics of diesel fuel, the same existing theoretical model has been used.

2. Materials and methods

Tests were carried out in the CIRAD Biomass Energy laboratory in Montpellier (France), with the collaboration of the “Laboratoire de Physique et de Chimie de l’Environnement” (Burkina Faso) and the “Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologies” (Burkina Faso).

In this study, the fibre-suspended droplet technique has been used. The experimental device consists of three main sets: the heating device and suspension system of the droplet, the measurement and data logging system of the temperature near the droplet and the measurement system and image processing. Fig. 1 shows the schematic diagram of the experimental apparatus.

2.1. Heating device and suspension system of the droplet

This includes the heating system, hot gases duct and the suspension system of the droplet. The hot gas flow is obtained using a gas burner (MEKER) powered by a butane/air mixture. The hot gas temperature is controlled by adjusting the butane gas supplying pressure with a pressure regulator. This hot gas enters at the bottom of the duct where the burner head is located and flows through a duct of square section ($25 \times 10^{-4} \text{ m}^2$), 0.50 m long. At the outlet of the duct where is placed a grid, the hot gas is diluted with ambient air surrounding the droplet before reaching the

droplet. This duct has a grid (thickness 1 mm; 40 holes of diameter 5 mm) placed above it that homogenizes the flow and allows obtaining a uniform temperature field around the droplet and a uniform and low velocity of the flow. The atmosphere around the droplet is controlled by measuring: the temperature close to the droplet (at 2 mm), the butane gas flow, the velocity and the composition of the hot gases at the duct outlet. A measure of the temperature field allowed verifying that the temperature is uniform between the measuring point and the point of suspension of the droplet. The flow velocity measured in the temperature range studied (684–917 K) with a Pitot tube is negligible ($<0.1 \text{ m/s}$) but sufficient to blow away the evaporated gases. Thus, the droplets are immersed in an environment of constant composition and poor in oxygen ($<5\%$).

Droplets of diameters ranging from 1 to $1.42 \times 10^{-3} \text{ m}$ are suspended on a quartz fibre (chosen for its low thermal conductivity) with a diameter of about $0.4 \times 10^{-3} \text{ m}$. The angle of inclination of the fibre is about 30° downward from the horizontal to avoid dropping out of the droplet.

A deflector derives hot gases away from the grid during the suspension of the droplet on the quartz fibre. The droplet is placed using a syringe on the quartz fibre at an ambient temperature of about 300 K. The acquisition is triggered at the same time the deflector derives hot gases to the droplet, rising instantaneously the atmosphere temperature at the chosen temperature set.

2.2. Measurement and data logging system of temperature

The temperature around the droplet is measured with a type K thermocouple of diameter $0.25 \times 10^{-3} \text{ m}$ which is placed at a distance of about 2 mm of the droplet during the measurement of the projected surface of the droplet. This thermocouple, due to its low

Author's personal copy

2866

T. Daho et al. / International Journal of Heat and Mass Transfer 55 (2012) 2864–2871

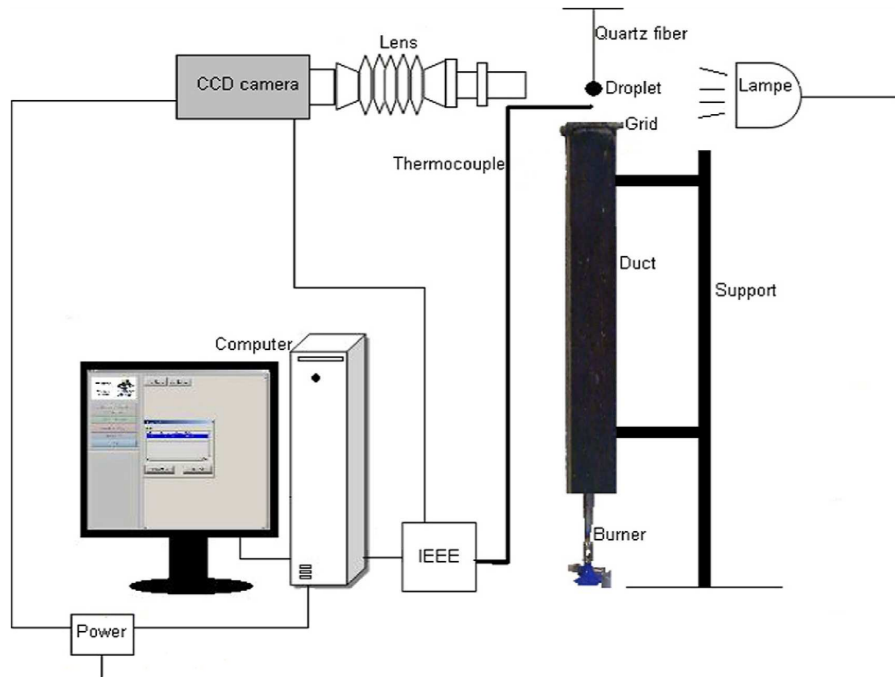


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

inertia and its very fast response time allows a fairly accurate estimate of the temperature. The small diameter of the thermocouple also avoids the disruption of gas in the vicinity of the droplet. The acquisition of temperature is achieved through a converter that has a “thermocouple” input and a “USB” output.

2.3. Measurement system and image processing

To obtain the characteristics of evaporation of the droplets, the time dependence of the size of the droplets has been recorded along the vaporization process. This is performed by extracting the contours of the projected surfaces of the droplets at each time step. With the inclination of the quartz fibre and the gravity and fibre effects, the droplet has an ellipsoidal shape. The determination of the projected surface is performed by the software used by calculating an ellipse whose perimeter corresponds to the contours of the droplet. The diameter considered for the droplet is equivalent to that of a sphere which projected surface is equivalent to that of the ellipse. The recording apparatus used in this study consists primarily of a charge coupled device (CCD) camera connected to IEEE serial port, a computer and digital image processing software.

The CCD camera used is a monochromatic digital camera SONY type SX90 XCD. Its resolution is 1280 pixels horizontally and 960 pixels vertically. It allows acquisition of 30 fps. It is equipped with an optical system composed of three parts: a $0.25 \times$ lens, a $0.30\text{--}0.37\text{ m}$ lens and a $2 \times$ multiplier. The camera is connected to a microcomputer through an IEEE 1394 (FWB-PCIE1X20, 2 ports).

A specific software package (Alliance Vision) was developed for this study to handle the processing of the droplets images and to achieve the synchronization between the acquisition of each image and the temperature measurement.

The droplet is illuminated from the side opposite to the camera (Fig. 1) to create a contrast between the image of the droplet and the background of the picture. The acquisition and the image processing are initiated from a temperature threshold predefined by the user. Once the image is scanned, the software can perform the operations of thresholding, extraction of the contour of the droplet in real time, calculation of the projected surface of the droplet and data storage.

The uncertainty in the determination of the projected surface is such that $\Delta d^2/d^2$ is about 3%, and the uncertainty in the determination of the constant of evaporation K is about 9%. For each fuel, the tests are conducted at least five times to check repeatability of measurements.

2.4. Material used

The fuels used are refined cottonseed oil and diesel fuel. Their physical and chemical characteristics are given in Table 1. Fatty acids composition of cottonseed oil and the structure of its main fatty acids are given in Table 2.

3. Description of the model

3.1. Basic equations

The model used is based on the quasi-steady assumptions which are presented and discussed in the literature [1,7,19–23]. These assumptions and equations of continuity, energy and species conservation, lead to the d^2 law given by Eq. (1).

$$d^2(t) = d_0^2 - K(t - t_0) \quad (1)$$

with

Table 1
Physical and chemical properties of cottonseed oil and diesel fuel.

Properties	Methods	Cottonseed oil	Diesel fuel
Density (kg/m ³ at 15 °C)	NF EN ISO 12185	922	844
Kinematic viscosity (mm ² /s at 37.8 °C)	NF EN ISO 3104	35.7	3.3
Cloud point (°C)	NF T60 105	0	<−6
Pour point (°C)	NF T60 105	−3	−9
Flash point (°C)	NF EN ISO 2719	230	63
Surface tension (mN/m)	NF EN 14 370	32.4	28.6
Low heating value (kJ/kg)	ASTM D 240	36400	43700
Carbon residue (%)	NF EN ISO 10370	0.41	0.08

Table 2
Fatty acid composition of cottonseed oil.

Fatty acid	Formula	Structure	Percentage (%)
Myristic (C14:0)	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	CH ₃ (CH ₂) ₁₂ COOH	0.80
Palmitic (C16:0)	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	CH ₃ (CH ₂) ₁₄ COOH	26.00
Palmitoleic (C16:1)	C ₁₆ H ₃₀ O ₂	CH ₃ (CH ₂) ₅ CH=CH(CH ₂) ₇ COOH	0.60
Stearic (C18:0)	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	CH ₃ (CH ₂) ₁₆ COOH	2.40
Oleic (C18:1)	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	CH ₃ (CH ₂) ₇ CH=CH(CH ₂) ₇ COOH	18.20
Linoleic (C18:2)	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	CH ₃ (CH ₂) ₄ CH=CH-CH ₂ -CH=CH(CH ₂) ₇ COOH	51.50
Linolenic (C18:3)	C ₁₈ H ₃₀ O ₂	CH ₃ -(CH ₂) ₃ -CH=CH-CH=CH-CH=CH(CH ₂) ₇ COOH	0.20
Arachidic (C20:0)	C ₂₀ H ₄₀ O ₂	CH ₃ (CH ₂) ₁₈ COOH	0.30

$$K = 8 \frac{\rho_{fg}}{\rho_{kl}} D \ln(1 + B_M) = 8 \frac{\lambda_g}{c_{pg} \rho_{fl}} \ln(1 + B_T) \quad (2)$$

and

$$B_M = \frac{Y_{fs} - Y_{f\infty}}{1 - Y_{fs}} \quad (3)$$

$$B_T = \frac{c_{pg}(T_\infty - T_s)}{L_v} \quad (4)$$

The mass fraction of the fuel at the droplet surface Y_{fs} is determined by Eq. (5) below:

$$Y_{fs} = \frac{P_{sat} M_f}{P_{sat} M_f + (P - P_{sat}) M_a} \quad (5)$$

P_{sat} is the saturation vapor pressure of the fuel at the surface temperature T_s of the droplet given by the equation of Clausius–Clapeyron:

$$P_{sat} = \exp\left(a - \frac{b}{T_s - 43}\right) \quad (6)$$

Constants a and b for cottonseed oil were determined in this study using constants of each fatty acid. With regard to the diesel fuel, the data are taken from the literature [24].

In the quasi-steady conditions, the equality of heat and mass transfer numbers allows us to determine the surface temperature of the droplet by an iterative method, assuming that at the initial step, the surface temperature of the droplet is equal to the boiling temperature of the fuel. When the steady state is reached, there was an equilibrium temperature of the surface of the droplet T_s given by Eq. (7):

$$T_s = T_\infty - \left(\frac{Y_{fs} - Y_{f\infty}}{1 - Y_{fs}}\right) \frac{L_v}{c_{pg}} \quad (7)$$

Correlation of Ranz and Marshall [25–26], given by Eq. (8) is used to account for the effects of convection on the evaporation of droplets.

$$K_c = K \left(1 + 0.5 Pr^{1/3} Gr^{1/4}\right) \quad (8)$$

with

$$Gr = \frac{g \beta \rho_g^2 d_0^3 \Delta T}{\mu_g^2} \quad (9)$$

$$Pr = \frac{\mu_g c_{pg}}{\lambda_g} \quad (10)$$

In the case of low volatility fuels such as vegetable oils, the transient heating phase period is an important part of the total evaporation duration of the droplet. The lifetime (t_{ev}) of the droplet during evaporation is the sum of two parts: a time t_1 of transient phase (heating + evaporation or a potential dilatation of the droplet) and the evaporation time t_2 during the quasi-steady phase. Typically, two approaches are used to determine the time t_1 . The first approach considers that the energy supplied to the droplet during the transient phase is used primarily for its heating up from an initial temperature T_{s0} to the equilibrium temperature T_s . During this transient phase, there is no evaporation (the diameter is constant). The second approach considers that during the heating period (transient), the droplet evaporates with a moderate rate and that the square of its diameter decreases linearly with time [27].

The first approach has been adopted to determine the heating time of cottonseed oil and diesel fuel on the basis of the work of Morin [7]. During the transient phase of the evaporation of cottonseed oil, the droplet expands. This dilatation is not taken into account in these two approaches.

The influence of convection and the heating period in the determination of the adjusted constant of evaporation (K_{cc}) is taken into account by Eq. (11).

$$K_{cc} = K(1 + 0.5 Pr^{1/3} Gr_{d_{cc}}^{1/4}) \quad (11)$$

In the calculation of the Grashof number, the corrected diameter d_{cc} is not the initial diameter of the droplet. It corresponds to the average diameter of the droplet on the steady phase given by Eq. (12) [7].

$$d_{cc} = 0.5^{4/3} (d_0^2 - K_h t_1)^{1/2} \quad (12)$$

Here, the constant of evaporation during the heating phase K_h is zero. t_1 is the heating time. Therefore an average diameter of the steady phase d_{cc} is given by Eq. (13).

$$d_{cc} = 0.5^{4/3} d_0 \quad (13)$$

Then the lifetime t_{ev} of the droplet is given by Eq. (14):

$$t_{ev} = t_1 + \frac{d_0^2}{K_x} \quad (14)$$

with

$$t_1 = -\frac{\rho_{f1} C_{pl} d}{6h} \ln \left(\frac{T_s - T_\infty}{T_{s0} - T_\infty} \right) \quad (15)$$

For the determination of the heat transfer coefficient h in Eq. (15), the correlation of Yuge [28] has been used for Nusselt number

$$Nu = 2 + 0.43(GrPr)^{1/4}; \quad 1 < GrPr < 100,000 \quad (16)$$

3.2. Thermodynamic and transport properties

The latent heat of vaporization (L_v) of the fuel is estimated in this study by Watson relation [29] given by Eq. (17).

$$L_v = L_{v(Teb)} \left[\frac{T_c - T_s}{T_c - T_{ebf}} \right]^{0.38} \quad (17)$$

Jöback and Reid method [30] has been used for the determination of critical parameters of the various fatty acids. This method is based on the contribution of different functional groups for a given compound in the evaluation of its properties.

The latent heat of vaporization at the boiling point is given by Eq. (18) below:

$$L_{v(Tebf)} = 1.093RT_c \left[T_{ebf} \frac{(\ln(P_c) - 1)}{0.93 - T_{ebf}} \right] \quad (18)$$

with:

R , the universal constant of ideal gases

T_{ebf} , reduced normal boiling temperature ($T_{ebf} = \frac{T_{ebf}}{T_c}$)

T_c and P_c are respectively the critical temperature and pressure.

$$T_c = T_{ebf} \left[0.584 + 0.965 \sum \Delta_{Ti} - \left(\sum \Delta_{Ti} \right)^2 \right] \quad (19)$$

$$P_c = \left[0.113 + 0.0032 \cdot n_A - \sum \Delta_{pi} \right]^{-2} \quad (20)$$

Where Δ_{Ti} and Δ_{pi} are respectively the constant related to each functional group i of the three main fatty acids contained in cottonseed oil (Table 2). n_A is the number of atoms in the molecule.

For diesel fuel, these parameters are taken from the literature [24].

The thermal conductivity (λ_g) and the constant pressure specific heat of the gas mixture (c_{pg}) are determined at a reference temperature (T_r) and a reference composition (Y_{fr}).

$$T_r = T_s + \frac{(T_\infty - T_s)}{3}$$

$$Y_{fr} = \frac{2}{3} Y_{fs} \text{ and } Y_{Ar} = 1 - \frac{2}{3} Y_{fs}$$

Y_{Ar} reference mass fraction for air.

The specific heat and thermal conductivity of the gas mixture around the droplet are calculated respectively by Eqs. (21) and (22).

$$c_{pg} = Y_{fr} c_{pgf}(T_r) + Y_{Ar} c_{pA}(T_r) \quad (21)$$

$$\lambda = Y_{fr} \lambda_{fg}(T_r) + Y_{Ar} \lambda_A(T_r) \quad (22)$$

$c_{pgf}(T_r)$ and $c_{pA}(T_r)$ are respectively the specific heat of fuel vapor and air at the reference temperature. They are calculated by Jöback and Reid method, Eq. (23).

$$c_p(T_r) = A + BT_r + CT_r^2 + DT_r^3 \quad (23)$$

A , B , C , D and E are constants relative to fuel or air. They are obtained for cottonseed oil by using the groups-contribution method of Jöback and Reid. $\lambda_{fg}(T_r)$ and $\lambda_A(T_r)$ are respectively the thermal conductivity of the fuel vapor and air at the reference temperature. They are determined by Jöback method (Eq. (24)) for air and by Eucken correlation for fuel vapor [31], Eq. (25).

$$\lambda_A(T_r) = a + bT_r + cT_r^2 + dT_r^3 + eT_r^4 \quad (24)$$

$$\lambda_{fg} = \frac{(c_{pgf} M_{f-R})}{M_f} \mu_{fg} \left[1 + \frac{\frac{9}{4}}{\left(\frac{c_{pgf}}{R} - 1 \right)} \right] \quad (25)$$

a , b , c , d and e are constants.

In Eq. (25), the viscosity of the fuel vapor is calculated by the Chapman–Enskog equation which is based on the kinetic theory of gases, Eq. (26).

$$\mu_{fg} = \frac{2.6693 + 10^{-6} (M_f T_r)^{1/2}}{\theta_v^2 \Omega_v} \quad (26)$$

Ω_v , the collision integral for viscosity is calculated by Neufeld relation, Eq. (27) [31].

$$\Omega_v = \frac{A^r}{T^{-B^r}} + \frac{C^r}{\exp(D^r T^{-r})} + \frac{E^r}{\exp(F^r T^{-r})} \quad (27)$$

With $T^r = \frac{k_B T_r}{\epsilon_f}$

A^r , B^r , C^r , D^r , E^r and F^r are constants

ϵ_f is related to the potential function of Lennard–Jones () which describes the intermolecular energy depending on the distance between two molecules, Eq. (28).

$$\phi = 4\epsilon \left(\left(\frac{\theta}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\theta}{r} \right)^6 \right) \quad (28)$$

In this work, the following expressions are used to determine ϵ and θ [32].

$$\frac{\epsilon}{k_B} = 0.77T_c \text{ and } \theta = 2.44 \left(\frac{T_c}{P_c} \right)^{1/3}$$

The liquid fuel density is estimated at the droplet surface temperature. That of gaseous fuel is derived from the equation of state of ideal gases.

The gas mixture viscosity (μ_g) is calculated by Wilke method, Eq. (29) [32].

$$\mu_g = \sum_{i=1}^n \frac{y_i \mu_i}{\sum_{j=1}^n y_j \mu_{ij}} \quad (29)$$

$$\text{with } \Psi_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{0.5} \left(\frac{M_i}{M_j} \right)^{0.25} \right]^2}{\left[B \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right) \right]^{0.5}} \quad (30)$$

y_i is the mass fraction of gas (i). i and j are related to air or fuel vapors.

4. Results and discussion

4.1. Constant of evaporation

Fig. 2 shows the evolution of constants of evaporation of the two fuels obtained by the quasi-steady model and Ranz and Marshall correlation (taking into account or not the influence of the transient phase) versus temperature. It may be noted that constants of evaporation of cottonseed oil are increasing faster than those of diesel fuel as the temperature increases. This phenomenon has been observed experimentally by previous studies [7] and same results were obtained in this work (Fig. 3).

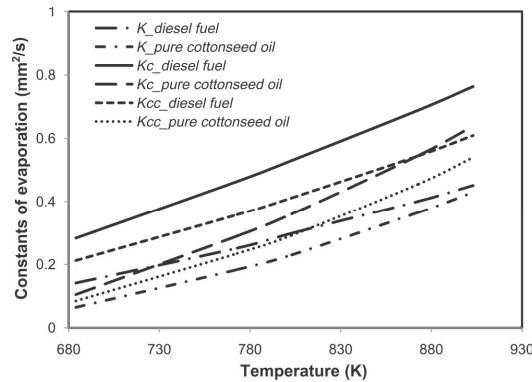


Fig. 2. Theoretical constants of evaporation of diesel fuel and cottonseed oil. K , K_c and K_{cc} are respectively theoretical constants of evaporation from quasi-steady model, Ranz and Marshall correlation and Ranz and Marshall correlation taking into account the influence of heating phase of the droplet.

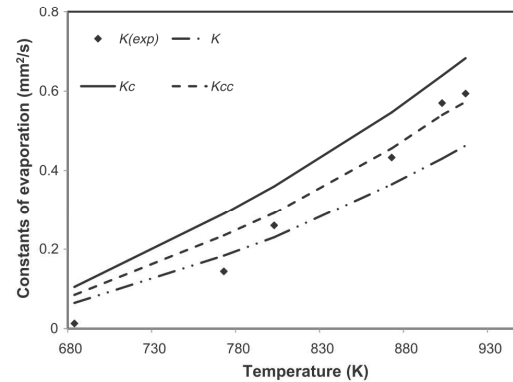


Fig. 5. Experimental and theoretical constants of evaporation of cottonseed oil. With $K(\text{exp})$, the experimental values of constants of evaporation of cottonseed oil.

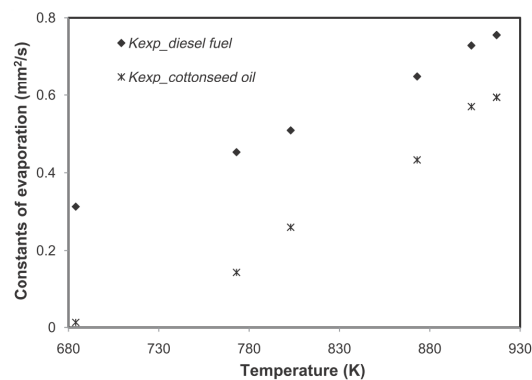


Fig. 3. Experimental constants of evaporation of diesel fuel and cottonseed oil. $K_{\text{exp,diesel fuel}}$ and $K_{\text{exp,cottonseed oil}}$ are respectively the experimental constants of evaporation of diesel fuel and cottonseed oil.

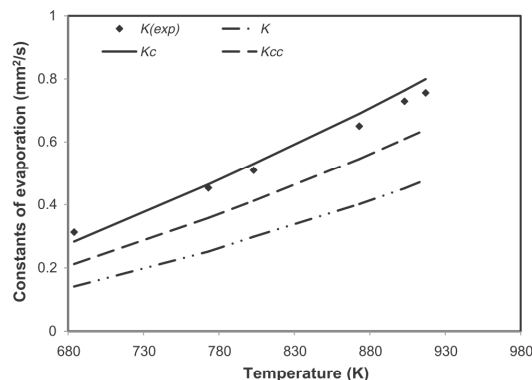


Fig. 4. Experimental and theoretical constants of evaporation of diesel fuel. With $K(\text{exp})$, the experimental values of constants of evaporation of diesel fuel.

Figs. 4 and 5 show the evolution of theoretical and experimental constants of evaporation of respectively diesel fuel and cottonseed oil as a function of temperature.

- For diesel fuel: experimental values of constants of evaporation are higher than theoretical ones obtained by the quasi-steady model (K) or the values obtained when considering the cumulative effects of convection and transient phase (K_{cc}). However, theoretical values obtained after taking into account the convection only (K_c) show good agreement with experimental values. This result shows that the influence of convection phenomena is important and that the heating period has little influence on the constant of evaporation during the evaporation of diesel fuel in the studied temperature range. Given this result, it is not necessary to take into account the influence of the transient phase in the prediction of the constant of evaporation of diesel fuel. Constants of evaporation of droplet of diesel fuel are well predicted with Ranz and Marshall correlation taking into account only the convection.
- For cottonseed oil: for low temperatures (684 K to 773 K), experimental values of constants of evaporation are lower than theoretical values (considering or not of the effect of convection and transient phase). When the temperature increases from 684 K to 773 K, experimental values are however close to theoretical values of the quasi-steady model. This result is due to the fact that the quasi-steady model, in addition to its simplifying assumptions, does not take into account the phenomenon of dilatation of the droplet whose duration is longer at low temperatures. Furthermore, the convective phenomena are lower at low temperatures. For temperatures above 773 K, experimental and theoretical values of constants of evaporation are close when taking into account the convection and the influence of heating phase. Indeed, with increasing ambient temperature, the convection becomes significant but the influence of the transient phase remains higher than in the case of diesel fuel. For temperatures below 773 K, it is not necessary to take into account the influence of convection for the prediction of the constant of evaporation of cottonseed oil. However, for temperatures above 773 K, it is essential to take into account the convection and the influence of the transient phase. In summary, for cottonseed oil and for temperatures below 773 K the quasi-steady model gives acceptable results, while for temperatures above 773 K, Ranz and Marshall correlation taking into account the influence of convection and transient phase gives good prediction of the values of constant of evaporation.

Despite the specificities of pure vegetable oils, the results on the prediction of evaporation constants of pure cottonseed oil are consistent with results obtained by Morin et al. [7] with rapeseed methyl ester and Dirbude et al. [13] with rapeseed and sunflower methyl esters. Indeed, these studies have shown that the correlation of Ranz and Marshall corrected or not, taking into account natural or forced convection, depending on the case, may give a good prediction of the constant of evaporation of these products.

4.2. Heating time and total time of the evaporation process

The experimental heating time was determined by considering the interval between the initial time ($t=0$) and the time corresponding to the point of intersection between the straight line which equation is $d^2 = d_0^2$, and the regression line of the steady part of the evaporation (Fig. 6). During this period called “heating time” the expansion is predominant in first place and then, unsteady evaporation takes place with a moderate rate. This unsteady evaporation is necessary to counterbalance the increase of diameter due to dilatation although the model used neglects the evaporation during the unsteady phase.

The experimental and theoretical heating time of diesel fuel and cottonseed oil droplets decrease rapidly with increasing temperature and tend towards asymptotic values (Fig. 7). The experimental and theoretical values are in agreement for high temperatures for cottonseed oil. Indeed, when the temperature increases, the transient phase is shorter so that phenomena of dilatation decrease. The droplet diameter can thus be considered constant during this phase. This assumption is adopted in the theoretical model, thus obtaining good agreement between theoretical and experimental results at high temperatures is consistent. However, as the dilatation is more important at low temperatures (<773 K), this induces a greater error on the assumption that the droplet diameter remains constant during the heating phase. This would explain the discrepancies between theoretical and experimental results for relatively low temperatures. The model gives a rather rough prediction of the heating time for diesel fuel compared to cottonseed oil. In the temperature range of 840–917 K, the relative error of total time of evaporation varies between 45% and 48% for diesel fuel while it varies between 2% and 14% for cottonseed oil. For the heating time, the relative differences for diesel fuel exceed 100%. This result is due to the fact that unsteady evaporation is more important during the transient phase for diesel fuel (unsteady evaporation not taken into account in the model). The model therefore overestimates the heating time. Also, the data used for diesel fuel are from literature [24]. As diesel fuel is a hydrocarbon mixture

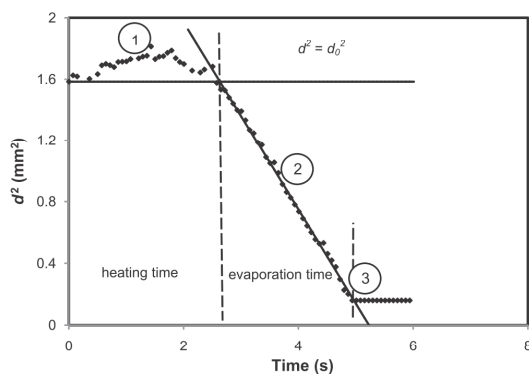


Fig. 6. Method for determining the periods of heating and evaporation

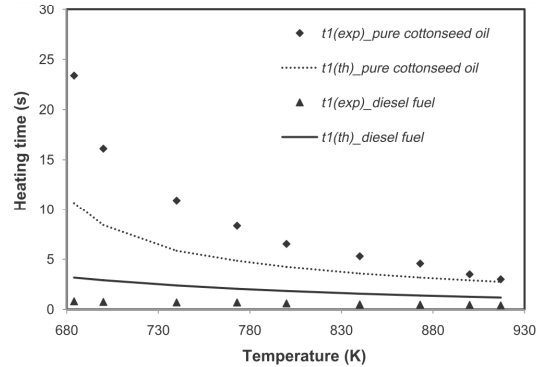


Fig. 7. Theoretical and experimental heating time. $t_1(\text{exp})$ and $t_1(\text{th})$ are respectively the experimental and theoretical heating time.

whose properties depend largely on crude oil origin, its properties differ greatly from any particular diesel fuel. The diesel fuel used is a commercial diesel that meets current standards in France. These standards differ from the diesel fuel which properties have been used in this study. This may partly explain the large differences on this unsteady phase (more sensitive to inhomogeneities of the fuel).

Experimental and theoretical heating time of diesel fuel and vegetable oil are becoming closer at temperatures higher than 840 K (Fig. 7). This is in agreement with results obtained for constants of evaporation (Figs. 2 and 3).

The differences of heating time observed between diesel fuel and cottonseed oil can be explained by the phenomenon of expansion which is more important with cottonseed oil compared to diesel fuel, probably due to its surface tension higher than that of diesel fuel (Table 1). Also, during the transient phase, although the model neglects the evaporation during this phase, the expansion is followed by a low evaporation (with a low rate) of cottonseed oil. As cottonseed oil evaporates more slowly than diesel fuel, this increases the duration of the transient phase. Moreover, during this phase of low evaporation chemical reactions (decomposition, polymerization ...) may occur due to the different chemical nature of vegetable oil (triglycerides). Indeed, the triglycerides which compose the vegetable oil need to decompose, if the temperature is sufficient, before evaporating. In the case of diesel fuel, which comprises a mixture of pure components, there is evaporation mainly

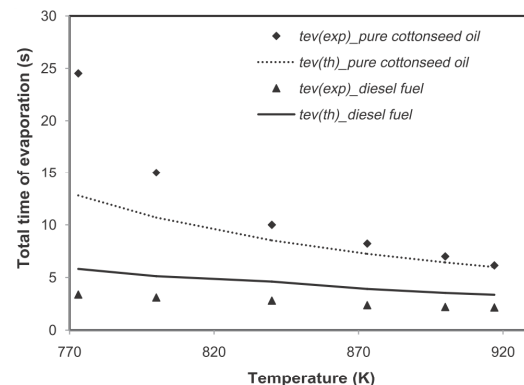


Fig. 8. Theoretical and experimental total time of evaporation. $t_{ev}(\text{exp})$ and $t_{ev}(\text{th})$ are respectively the experimental and theoretical total time of evaporation.

due to the differences in boiling point. All these phenomena can explain the heating times longer for cottonseed oil droplets.

Total time t_{ev} is the addition of the heating time and the steady evaporation time. Eq. (14) is expressed according to the conclusion proposed for the calculation of constants of evaporation: for diesel fuel K_x becomes K_c at temperature range from 773 K to 917 K, as for cottonseed oil, K_x takes the value of K_{cc} from 773 K to 917 K. Total time is not calculated below 773 K because constants of evaporation of cottonseed oil become low so that total times go to infinity (there is no evaporation of cottonseed oil at 600 K).

Total time of evaporation of diesel fuel and vegetable oil are following the same tendency as the heating time at temperatures higher than 840 K: the correlation is good for cottonseed oil and values of diesel fuel and cottonseed oil are becoming closer (Fig. 8). For cottonseed oil, below 840 K there is a discrepancy between the experimental and theoretical values which is certainly due to an underestimation of the dilation of the droplet in the calculation.

In addition to the reasons mentioned for the heating time, the differences between both fuels are probably due to the latent heat of vaporization of cottonseed oil which is higher than that of diesel fuel. This leads to values of constant of evaporation lower for cottonseed oil according to Eqs. (2) and (3) (for the steady phase). The total time of evaporation which depends on the constant of evaporation is therefore higher for cottonseed oil. However, constant of evaporation of cottonseed oil grows faster than that of diesel fuel depending on temperature and become closer to that of diesel fuel with increasing temperature. Therefore total time of evaporation of diesel fuel and cottonseed oil are becoming closer.

5. Conclusion

The theoretical model developed in this work is a good tool to approach a good prediction of constants of evaporation and evaporation time for vegetable oils. In particular, the determination of transport and thermodynamic properties of cottonseed oil using data calculated from its major fatty acids allows a good prediction of its constants of evaporation as a function of temperature.

Ranz and Marshall correlation, taking into account only convection phenomena, allows a good prediction of the constant of evaporation of diesel fuel in the studied temperature range. For cottonseed oil, the quasi-steady model gives the best prediction for constants of evaporation in the temperature range from 684 K to 773 K. But in the temperature range from 773 K to 917 K, Ranz and Marshall correlation, taking into account the influence of convection and transient phase of the droplet must be used to obtain a good prediction of the constant of evaporation.

For heating time and total time of the evaporation process of cottonseed oil, the model gives a rather good prediction for the temperature range from 840 K to 917 K.

The overall results are interesting for predicting certain behavior of vegetable oils as a function of temperature. However, it is necessary to take into account the phenomenon of dilatation of the droplet for a more accurate prediction of the duration of the transient phase and the constant of evaporation to improve the model. Furthermore, the influence of the quartz fiber should be considered for a possible correction of the droplet temperature. Finally, the predictive approach of evaporation characteristics of cottonseed oil, based on the calculation of its thermodynamic and transport properties from its major fatty acids should be extended to others terrestrial and microalgae oils.

References

- [1] P. Higelin, Huiles végétales – biocombustible diesel : incidence des aspects thermiques liés au type de moteur sur la combustion, PhD thesis, University of Orleans, France, 1992.
- [2] G. Vaitilingom, Utilisations énergétiques de l'huile de coton, Cahiers Agri. 15 (2006) 44–149.
- [3] T. Daho, G. Vaitilingom, O. Sanogo, Optimization of the combustion of blends of domestic fuel oil and cottonseed oil in a non-modified domestic boiler, Fuel 88 (2009) 1261–1268.
- [4] M.A. Kalam, H.H. Masjuki, Emissions and deposit characteristics of a small diesel engine when operated on preheated crude palm oil, Biomass Bioenergy 27 (2004) 289–297.
- [5] R.A. Korus, T.L. Mousetis, L. Lloyd, Polymerization of vegetable oils, in: ASAE, Proceedings of the International Conference on Plant and Vegetables Oils as Fuels, Fargo, USA, 1982, pp. 218–223.
- [6] A. Srivastava, R. Prasad, Triglycerides-based diesel fuels, Renew. Sustain. Energy Rev. 4 (2000) 111–133.
- [7] C. Morin, C. Chauveau, I. Gökalp, Droplet vaporization characteristics of domestic oil derived biofuels at high temperatures, Exp. Thermal Fluid Sci. 21 (2000) 41–50.
- [8] A. Daif, M. Bouaziz, X. Chesneau, A.A. Chérif, Comparison of multicomponent fuel droplet vaporization experiments in forced convection with the Sirignano model, Exp. Thermal Fluid Sci. 18 (1999) 282–290.
- [9] B. Abramzon, S. Sazhin, Convective vaporization of a fuel droplet with thermal radiation absorption, Fuel 85 (2006) 32–46.
- [10] A.P. Kryukov, V.Y. Levashov, S.S. Sazhin, Evaporation of diesel fuel droplets: kinetic versus hydrodynamic models, Int. J. Heat Mass Transfer 47 (2004) 2541–2549.
- [11] M. Shusser, The influence of thermal expansion flow on droplet evaporation, Int. J. Multiph. Flow 33 (2007) 40–50.
- [12] J. Barata, Modelling of biofuel droplets dispersion and evaporation, Renew. Energy 33 (2008) 69–779.
- [13] S. Dirbude, V. Eswaran, A. Kushari, Droplet vaporization modeling of rapeseed and sunflower methyl esters, Fuel 92 (2012) 171–179.
- [14] J. Brett, A. Ooi, J. Soria, The effect of internal diffusion on an evaporating bio-oil droplet – the chemistry free case, Biomass Bioenergy 34 (2010) 1134–1140.
- [15] V. Raghavan, S. Rajesh, P. Shintre, V. Avinash, Investigation of combustion characteristics of bio-diesel and its blends, Combust. Sci. Technol. 181 (2009) 877–891.
- [16] G. Vaitilingom, Huiles végétales – biocombustibles diesel: influence de la nature des huiles et en particulier de leur composition en acides gras sur la qualité-carburant, PhD thesis, University of Orleans, France, 1992.
- [17] Araya K, Tsunematsu S. Single drop combustion of sunflower oil. SAE paper 1988; 870590.
- [18] R.J. Crookes, F. Kiannejad, M.A.A. Nazha, Systematic assessment of combustion characteristics of biofuels and emulsions with water for use as diesel engine fuels, Energy Conversion Management 38 (1997) 1785–1795.
- [19] D.B. Spalding, The combustion of liquid fuels, in: fourth Symposium (International) on Combustion, the Combustion Institute, Pittsburgh, 1953, pp. 847–864.
- [20] G.A.E. Godsave, Studies of the combustion of drops in a fuel spray – the burning of single drops of fuel, in: fourth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1953, pp. 818–830.
- [21] F.A. Williams, On the assumptions underlying droplet vaporization and combustion theories, J. Chem. Phys. 33 (1960) 133–144.
- [22] G.L. Hubbard, V.E. Denny, A.F. Mills, Droplet vaporisation: effects of transient and variable properties, Int. J. Heat Mass Transfer 18 (1975) 1003–1008.
- [23] C.K. Law, Recent advances in droplet vaporization and combustion, Prog. Energy Combust. Sci. 8 (1982) 171–201.
- [24] S.S. Sazhin, W.A. Abdelghaffar, E.M. Sazhina, M.R. Heikal, Models for droplet transient heating: effects on droplet evaporation, ignition, and break-up, Int. J. Therm. Sci. 44 (2005) 610–622.
- [25] W.E. Ranz, W.R. Marshall, Evaporation from drops, Chem. Eng. Prog. 48 (3) (1952) 141–146.
- [26] W.E. Ranz, W.R. Marshall, Evaporation from drops, Chem. Eng. Prog. 48 (4) (1952) 173–180.
- [27] J.S. Chin, A.H. Lefebvre, The role of the heat-up period in the fuel drop evaporation, Int. J. Turbo Jet Engines 2 (1985) 315–325.
- [28] T. Yuge, Experiments on heat transfer from spheres including combined natural and forced convection, J. Heat Transfer 82 (1960) 214–220.
- [29] K.M. Watson, Prediction of critical temperatures and heats of vaporization, Ind. Eng. Chem. 23 (1931) 360–364.
- [30] K.G. Joback, R.C. Reid, Estimation of pure-component properties from group-contributions, Chem. Eng. Commun. 57 (1987) 233–243.
- [31] J.M. Praunitz, B.E. Poling, J.P. O'Connell, The properties of gases and liquids, 5th ed., McGraw-Hill, New York, 2001, pp. 9.1–10.34.
- [32] J.R. Welty, C.E. Wicks, R.E. Wilson, Fundamentals of Momentum Heat and Mass Transfer, 3rd ed., Wiley, New York, 1984.